

SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SOBRE UN VERTEDERO
RECTANGULAR, MEDIANTE EL USO DE UNA HERRAMIENTA
APLICADA A LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

DANIELA FERNANDA AGUILAR LAVERDE
VIVIANA ALEJANDRA ESCOBAR MORENO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2020

SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SOBRE UN VERTEDERO
RECTANGULAR, MEDIANTE EL USO DE UNA HERRAMIENTA
APLICADA A LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

DANIELA FERNANDA AGUILAR LAVERDE
VIVIANA ALEJANDRA ESCOBAR MORENO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Civil

Director
DIEGO ALEJANDRO PULGARIN MONTOYA
Ingeniero civil

Codirector
ALEXANDER VILLAMIZAR HERNÁNDEZ
Ingeniero civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2020



Resumen de Licencia Creative Commons

**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5
Colombia (CC BY-NC-ND 2.5 CO)**

Este es un resumen legible por humanos (y no un sustituto) de la [licencia](#).



Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia



Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.



SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 17 de noviembre de 2020

A nuestra familia y amigos

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento más sincero va dirigido al Co-Director de este proyecto Ingeniero Alexander Villamizar, quien nos eligió para desarrollar su idea y nos acompañó de principio a fin en el proceso. A nuestro director de tesis Ingeniero Diego Alejandro Pulgarín, quien, con su paciencia, interés y conocimientos, hizo sin duda alguna más fácil la culminación de esta etapa con los resultados esperados. A Daniela Aguilar, mi compañera de tesis quien fue gran motivación y ejemplo incluso en los momentos más críticos de este camino. A mi esposo, familia y amigos por creer en mí en este extenso andar, quienes me dieron ánimo para iniciar y finalizar, pero especialmente a mi mamá Nohora Moreno quien no dejó de velar por mí cada noche y cada día y no me dejó caer nunca, porque siempre miró a través de mis ojos ayudándome a enfocar en los momentos de confusión.

Muchas gracias a todos.

Alejandra Escobar Moreno

Primero, quisiera agradecer a nuestros directores, los ingenieros Alexander Villamizar y Diego Pulgarín, cuya experiencia, confianza y respaldo fueron invaluable durante el desarrollo del proyecto. Su orientación nos empujó en la dirección correcta y nos permitió culminar este trabajo con éxito.

Agradezco a nuestros compañeros de estudio, quienes aportaron la información que sirvió de base para nuestra investigación.

A mi familia y amigos, quienes, desde su conocimiento, contribuyeron en más de una manera a esta investigación y me brindaron un apoyo constante.

Finalmente, no podría haber terminado esta etapa sin Alejandra, con quien compartí alegrías y frustraciones durante el proceso. Agradezco poder haber desarrollado este proyecto con ella, porque ciertamente no hubiese podido hacerlo sin su conocimiento, aliento y apoyo.

Daniela Aguilar

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	17
3.2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	18
4. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	20
5. MARCO REFERENCIAL	21
5.1 MARCO TEÓRICO	21
5.2 MARCO CONCEPTUAL.....	23
5.2.1 Dinámica de fluidos computacional.....	23
5.2.2 Método de los volúmenes finitos.....	25
5.2.3 OpenFOAM.....	27
5.2.4 Número de Courant y Estabilidad del modelo.....	31
5.2.5 Evaluación de resultados.....	32
6. METODOLOGÍA	35
7. APLICACIÓN DEL MODELO EN OPENFOAM	39
7.1 AGRUPACIÓN Y SELECCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES	39
7.2 DISEÑO DE GEOMETRÍA Y CREACIÓN DE MALLA.....	41
7.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN OpenFOAM.....	44

7.4 PUESTA EN MARCHA DE LAS SIMULACIONES Y EXTRACCIÓN DE RESULTADOS	49
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
8.1 SELECCIÓN DE LA MALLA	52
8.2 COMPARACIÓN DE ALTURAS MEDIDAS Y VELOCIDADES PARA EL CASO BASE Y LOS CASOS HIPOTÉTICOS.....	57
8.3 VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD	64
8.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS	71
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
ANEXOS	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Categorías de rendimiento del modelo para indicar el nivel de bondad - NSE	32
Tabla 2. Categorías de rendimiento del modelo para indicar el nivel de bondad – R^2	33
Tabla 3. Agrupación y selección de datos experimentales.....	40
Tabla 4. Partes y dimensiones de los vertederos sin contracción, con una contracción y con dos contracciones.	42
Tabla 5. Características de las mallas creadas según tamaño, para los vertederos sin contracción, con una contracción y con dos contracciones.....	44
Tabla 6. Cálculo de las variables para la configuración del modelo - Malla 0.01m	46
Tabla 7. Cálculo de las variables para la configuración del modelo - Malla 0.03m	47
Tabla 8. Cálculo de las variables para la configuración del modelo - Malla 0.05m	47
Tabla 9. Resultados obtenidos para la malla 1 – 0.01m.....	52
Tabla 10. Resultados obtenidos para la malla 2 – 0.03m.....	53
Tabla 11. Resultados obtenidos para la malla 3 – 0.05m.....	53
Tabla 12. Alturas de la lámina de agua consolidadas para cada caso de modelación	55
Tabla 13. Evaluación de resultados – Altura de la lámina de agua.	72
Tabla 14. Evaluación de resultados – Caudal.	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura básica de un caso en OpenFOAM.....	29
Figura 2. Vertedero rectangular.	31
Figura 3. Geometría del canal horizontal y vertedero de una contracción.	41
Figura 4. Vertederos sin contracción, con una contracción y con dos contracciones.	42
Figura 5. Estructura de carpetas y subcarpetas con archivos modificables para una simulación en OpenFOAM.....	45
Figura 6. Representación esquemática de las condiciones de frontera establecidas	48
Figura 7. Comparación de las alturas de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero para los tres tamaños de malla y el valor experimental.	54
Figura 8. Comparativo entre el tamaño de malla y el tiempo computacional empleado.	55
Figura 9. Representación de la dispersión de los datos simulados comparados con los experimentales.	56
Figura 10. Comparación de la velocidad en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo I de modelación.....	57
Figura 11. Comparación de la velocidad en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo III de modelación.....	58
Figura 12. Comparación de la velocidad en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo V de modelación.	58
Figura 13. Comportamiento de la velocidad del flujo en el canal y sobre los diferentes tipos de vertederos para el grupo I de modelación.	59
Figura 14. Comportamiento de la velocidad del flujo en el canal y sobre los diferentes tipos de vertederos para el grupo III de modelación.	60
Figura 15. Comportamiento de la velocidad del flujo en el canal y sobre los diferentes tipos de vertederos para el grupo V de modelación.	60

Figura 16. Comparación de la altura de la lámina de agua en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo I de modelación.....	61
Figura 17. Comparación de la altura de la lámina de agua en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo III de modelación.....	61
Figura 18. Comparación de la altura de la lámina de agua en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo V de modelación.	62
Figura 19. Paso del flujo de agua para el parámetro de altura sobre la cresta del vertedero sin contracción.....	63
Figura 20. Paso del flujo de agua para el parámetro de altura sobre la cresta del vertedero con una contracción.....	63
Figura 21. Paso del flujo de agua para el parámetro de altura sobre la cresta del vertedero con dos contracciones.....	64
Figura 22. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo I	65
Figura 23. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo II	65
Figura 24. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo III	66
Figura 25. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo IV.....	66
Figura 26. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo V.....	67
Figura 27. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo VI.....	67
Figura 28. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo VII.....	68
Figura 29. Courant contra tiempo. Vertedero con una contracción – Grupo I	68
Figura 30. Courant contra tiempo. Vertedero con una contracción – Grupo III	69
Figura 31. Courant contra tiempo. Vertedero con una contracción – Grupo V.....	69
Figura 32. Courant contra tiempo. Vertedero con dos contracciones – Grupo I ...	70
Figura 33. Courant contra tiempo. Vertedero con dos contracciones – Grupo III..	70
Figura 34. Courant contra tiempo. Vertedero con dos contracciones – Grupo V..	71

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Guía de laboratorio	75
ANEXO B. Simulaciones OpenFOAM.....	75
ANEXO C. Sitio web	75

RESUMEN

OpenFOAM es una herramienta de modelado computacional que permite el análisis y resolución de problemas de flujo de fluidos a través de la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, una disciplina en auge que integra métodos numéricos, ciencias computacionales y mecánica de fluidos para resolver las ecuaciones que describen su comportamiento.

Este trabajo investigativo emplea esta herramienta para ejecutar una simulación del comportamiento hidráulico de un vertedero rectangular, ubicado en el canal horizontal abierto del laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, y obtener las velocidades del flujo y la altura de la lámina de agua sobre la cresta que permiten estimar el caudal transportado, con el propósito de realizar comparaciones con resultados obtenidos de manera experimental.

La evaluación de los resultados obtenidos con el modelo se hizo empleando cinco criterios estadísticos: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2) y error porcentual absoluto medio (MAPE). Todas las simulaciones ejecutadas presentaron valores favorables para NSE, MAE, RMSE y R^2 obteniendo valoraciones descriptivas entre buenas y excelentes. Para el último criterio, MAPE, se obtuvieron resultados regulares.

PALABRAS CLAVE: *Dinámica de fluidos computacional, OpenFOAM, simulación computacional.*

ABSTRACT

OpenFOAM is a computational modeling tool that allows analysis and resolution of problems that involve fluid flows through computational fluid dynamics approaches, a booming discipline that integrates numerical methods, computer science, and fluid mechanics as a means to solve the governing equations of fluid flow.

This software was used in this research to model and simulate the hydraulic behavior of a rectangular weir in the horizontal channel of the hydraulics laboratory of the Catholic University of Colombia (Universidad Católica de Colombia), obtaining the flow velocities and the height of the water surface above the notch to estimate the corresponding flow rate, in order to make comparisons with experimental data.

Simulation results (model) were evaluated by several statistical measures: Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), mean absolute error (MAE), root-mean-square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), and mean absolute percentage error (MAPE). All executed simulations exhibited favorable values for most of the analyzed parameters; average results were obtained for MAPE.

KEYWORDS: *Computational Fluid Dynamics, OpenFOAM, Computational simulations*

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Ortiz (2006), la hidrodinámica es el componente de la mecánica de fluidos que se encarga del estudio del movimiento de estos. En los últimos tiempos, el análisis y desarrollo de esta ciencia ha empezado a aprovechar las herramientas computacionales y los diferentes softwares disponibles para realizar simulaciones que representen las condiciones de un proyecto o idea que se quiera materializar a corto, mediano o largo plazo, utilizando los métodos numéricos para solucionar las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados (Versteeg, y otros, 2007). Lo anteriormente mencionado se conoce como dinámica de fluidos computacional (más conocida por sus siglas en inglés CFD – *Computational Fluid Dynamics* –, en adelante CFD).

Desde principios de los ochentas, la necesidad del desarrollo de códigos numéricos y sus múltiples aplicaciones, han dado pauta a la creación de diferentes software o paquetes comerciales que permitan al usuario simular en una plataforma, todo aquello que desea construir o llevar a cabo en la realidad, buscando así la optimización de procesos, la predicción de la futura funcionalidad de una idea y la reducción de los posibles eventos que puedan representar un riesgo para la humanidad o para la economía de determinado proyecto; por ello Xamán (2016) considera que dado el abundante número de paquetes que trabajan con dinámica de fluidos computacional, esta no debe ser considerada como una herramienta meramente académica o de uso limitado a personal sumamente capacitado, por cuanto ya es empleada en diversos sectores e industrias.

Si bien existen diversos métodos numéricos para resolver y describir el movimiento de un fluido, el más utilizado es el *método de volúmenes finitos*, que como indica Aztroza Salazar (2017), basa su análisis en la discretización del espacio en numerosos volúmenes de control, aplicado a leyes de conservación con el fin de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes a través de una transición de ecuaciones diferenciales continuas a ecuaciones lineales, facilitando así la modelación o simulación a través de herramientas propias de la dinámica de fluidos computacional. En la actualidad es posible encontrar múltiples programas que se desarrollan en el ámbito de la CFD, de los cuales destacan Fluent y CFX de ANSYS Inc, Star-CCM+ y OpenFOAM,

Esta investigación pretende llevar a cabo la simulación y análisis del comportamiento hidráulico de un vertedero rectangular utilizando OpenFOAM, siendo este un software de uso libre, que no requiere de la compra de una licencia, permitiendo la adaptación de su código según sea conveniente; sus resultados serán comparados con aquellos obtenidos en los ensayos de laboratorio.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Simular el flujo de agua sobre un vertedero rectangular de pared delgada y sin contracción, en el canal horizontal abierto del laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, empleando un software de dinámica de fluidos computacional de uso libre.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la velocidad del flujo y la lámina de agua, con el fin de estimar caudal transportado por el canal del laboratorio de hidráulica, para al menos cuatro (4) prácticas de laboratorios sobre vertederos, realizadas por estudiantes que cursaron la asignatura de Hidráulica y Laboratorio.
- Adaptar un código utilizando la herramienta computacional de OpenFOAM, para realizar la simulación de los ensayos de laboratorio.
- Comparar los resultados de caudal y la carga de la cresta en el vertedero, obtenidos con el software de uso libre OpenFOAM y los obtenidos de manera experimental en el laboratorio, mediante los siguientes criterios estadísticos¹: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), error absoluto medio (MAE), error porcentual absoluto medio (MAPE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2).

¹ Inicialmente se planteó la evaluación empleando la técnica de análisis de varianza - ANOVA y una prueba t de student, dos pruebas que asumen la aleatoriedad de los eventos y la normalidad en la variable cuantitativa. El ensayo a simular no cumple con estos dos aspectos así que estas pruebas no son aplicables y han sido reemplazadas por el error absoluto medio – MAE y la raíz del error cuadrático medio - RMSE

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los vertederos, son estructuras ampliamente usadas en canales de flujo de agua abiertos, con el fin de controlar el nivel de la lámina de agua y medir caudales según sea el caso. Es así como Afif Khouri (2004), en su texto define vertedero, como “...una abertura realizada en una pared o presa, dispuesta de tal modo que el agua que sobrepase cierto nivel, vierte o desagüe por encima de la obra...”.

Aunque son mayores las prestaciones que ofrecen estas estructuras, cabe resaltar que presentan también una serie de inconvenientes que se resumen en tres principales aspectos: sedimentos, pérdidas de carga muy grandes y son estructuras no recomendables para canales revestidos (Vega B., 2004). De acuerdo a lo anterior y compartiendo conceptos muy similares, Aguirre Núñez y Venegas Espinoza (2005) expresan que otro problema típico de los vertederos, en cuanto a un funcionamiento adecuado, es el requerimiento de una gran altura desde el fondo del canal hasta la cresta, generando así una gran longitud de remanso; entendiendo esta última, como la distancia que necesita el flujo aguas abajo para alcanzar el nivel del curso natural del agua.

Por otra parte, diferentes trabajos como los de Villamizar Hernández (2014), Aztroza Salazar (2017), Shaikhli y Kadhim (2018) y Fleit, Baranya y Bihs (2017), han demostrado que herramientas computacionales que utilizan métodos numéricos (volúmenes finitos y diferencias finitas) para solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes, logran simular favorablemente las condiciones de flujo sobre canales abiertos y estructuras hidráulicas.

Con base en lo anterior, es necesario un estudio riguroso del comportamiento del flujo de agua sobre vertederos, proponiendo para esta investigación una simulación que permita la representación de la lámina de agua en este tipo de estructuras, utilizando los conceptos de la dinámica de fluidos computacional (CFD).

El trabajo que se pretende desarrollar, adicionalmente tiene como propósito fomentar investigaciones futuras sobre casos puntuales del correcto funcionamiento de los vertederos, orientando a las personas que se dediquen a dicho tema, sobre el uso de una herramienta complementaria (basados en modelos matemáticos) a los modelos físicos y/o prototipos, sin desconocer la importancia de los mismos. Otro aporte de esta investigación es la posibilidad de la creación de un laboratorio virtual, en donde los estudiantes puedan contrastar los modelos matemáticos con los prototipos existentes en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia.

Por consiguiente, la pregunta que se quiere responder con esta investigación es: ¿Es posible representar satisfactoriamente la carga de agua sobre la cresta de un vertedero rectangular en un canal abierto, para diferentes condiciones de flujo, mediante el enfoque de la dinámica de fluidos computacional?

3.2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, la dinámica de fluidos computacional (CFD), ha proporcionado a múltiples disciplinas, entre ellas a la ingeniería civil, la solución mediante métodos numéricos de muchos problemas que involucran el flujo de fluidos y que no tienen una solución a través de métodos convencionales, usando simulaciones para evaluar el comportamiento de cualquier fluido. Los métodos numéricos han sido usados para el diseño de estructuras hidráulicas desde inicios del siglo XXI siendo sus aplicaciones más sobresalientes la simulación del flujo en superficies libres y canales abiertos (Mr-CFD, 2020).

Uno de los documentos consultados sobre el tema de la CFD, es el trabajo de grado de maestría del ingeniero Villamizar, cuyo estudio está basado en la aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal, haciendo uso del software gratuito OpenFOAM y teniendo como referencia para la descripción matemática de los fluidos, la ecuación de Navier-Stokes. En sus conclusiones más importantes, destacó la versatilidad del software OpenFOAM en cuanto a su ejecución, y mostró también un resultado interesante entre la combinación de esta herramienta con los beneficios ofrecidos por el software Salome-Meca, donde pudo concluir lo siguiente:

La herramienta SALOME-MECA, resultó ser muy útil para la creación de la geometría y malla del canal horizontal, debido a la facilidad de manipularlo y esquematizar la compuerta, los obstáculos en el fondo y las dos inclinaciones de las persianas, haciendo uso de una malla híbrida (malla estructurada y no estructurada) y una simplificación en la salida de flujo del canal (2014 pág. 212).

Hacia el año 2017, se adelantó un estudio de desarrollo de dinámica de fluidos computacional titulado “Método de volúmenes finitos aplicado a las ecuaciones de Navier Stokes y en el funcionamiento de vertederos”, en donde Aztroza Salazar (2017) señala el método de los volúmenes finitos como uno de los principales métodos numéricos empleados para la resolución de las ecuaciones. El método está basado en la discretización espacial en muchos volúmenes de control y en la aplicación de las leyes de conservación de la masa y el momento lineal (para el caso de las ecuaciones de Navier Stokes) sobre cada uno de estos, consiguiendo de esta manera, soluciones en puntos discretos del espacio. El objeto de dicha investigación, fue la aplicación del método de volúmenes finitos en un problema típico de la hidráulica mediante procesos experimentales propios de un canal hidráulico específico de un espacio académico, para posteriormente llevar a cabo el

modelado en el software de uso libre OpenFOAM. Se demostró que, a pesar del pequeño tamaño del vertedero simulado, la herramienta computacional funciona satisfactoriamente en la predicción de cargas aguas arriba, obteniendo una curva de desgaste aproximada a la hallada experimentalmente.

Recurriendo a la CFD, Al Shaikhli y Kadhim (2018), al igual que Fleit, Baranya y Bihs (2017), realizan simulaciones para diferentes tipos de vertederos utilizando herramientas computacionales diferentes: los primeros simulan un vertedero rectangular y uno triangular a través de un software llamado FLOW 3D, mientras que los últimos modelan un vertedero de perfil Ogee empleando la herramienta de código abierto REEF3D. Ambos estudios destacan la capacidad de las herramientas para predecir y simular el flujo en los vertederos utilizados y prueban, a través de los resultados obtenidos, que el software de CFD constituye una herramienta adecuada para el modelado numérico en vista de la concordancia mostrada con los datos de laboratorio.

Por lo anterior, se destaca la importancia de estudiar el flujo de agua sobre vertederos, utilizando el enfoque de CFD, evidenciando los favorables resultados de los documentos revisados, haciendo uso de las herramientas computacionales, para solucionar las ecuaciones de Navier Stokes mediante su discretización.

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

La presente investigación se concentró en el estudio del comportamiento hidráulico del vertedero de sección rectangular, situado en el canal horizontal dispuesto en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia.

Debido a las restricciones de acceso a las instalaciones de la universidad debido a la emergencia sanitaria, este estudio se limitó a los resultados de las simulaciones de los resultados de al menos cuatro (4) prácticas sobre vertederos, realizadas entre 2018 y 2019, por los estudiantes en el curso de hidráulica y laboratorio.

Se proporciona una guía de laboratorio que puede ser el punto de partida para la creación de un laboratorio virtual, en donde los estudiantes puedan contrastar los modelos matemáticos con los prototipos existentes en las instalaciones de la Universidad. Cabe aclarar que éste solo podrá ser utilizado para el vertedero anteriormente mencionado, es decir que el uso de vertederos de diferentes características requerirá de una simulación particular y diferente.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO TEÓRICO

Las ecuaciones de Navier Stokes, se desarrollaron a partir de las ecuaciones propuestas por Leonhard Euler, González-Santander y Castellano (2014) destacan que su aporte más sobresaliente fue la aplicación de los principios básicos de la conservación de la masa y la segunda ley de Newton en la obtención de un par de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que incorporaban la presión y el flujo del fluido, pero sin tener en cuenta su viscosidad.

La teoría de Navier Stokes surgió por la necesidad de involucrar el efecto de la viscosidad de un fluido en el análisis de su comportamiento y que esta a su vez pudiera ser calculada matemáticamente. El desarrollo de dichas ecuaciones duró alrededor de un siglo y fue el resultado de un conjunto de derivadas parciales no lineales, acopladas entre sí. En 1822 Claude-Louis Navier obtuvo la primera aproximación de las ecuaciones, logradas gracias a su trabajo experimental sobre modelos, luego, en el año de 1845, George Stokes consigue la deducción matemática de estas a través de su trabajo autónomo (González-Santander Martínez, y otros, 2014).

En conformidad con lo anterior, se deduce que las ecuaciones de Navier Stokes sirven para determinar el movimiento de un fluido viscoso caracterizado por tener una densidad constante y que, al ser multiplicadas por ese parámetro (densidad), se convierten en una expresión que representa una relación de fuerzas, Duarte (2004) precisa que dicha expresión se puede simplificar e integrar recurriendo a las siguientes hipótesis:

- El fluido es incompresible; exige que la densidad del fluido no cambie ni en el tiempo ni en el espacio, indicando que la convergencia del vector velocidad ($\nabla \cdot \mathbf{U}$) debe ser cero.
- El flujo es irrotacional, lo que supone que es un fluido no viscoso o que sus efectos viscosos son despreciables; la primera condición apunta a un fluido ideal mientras que la segunda indica que es un fluido incompresible cuyo movimiento de partículas es irrotacional.
- Se considera una longitud elemental en una línea de corriente; es evidente que para recorrer una distancia a cierta velocidad U , se requiere de un tiempo determinado.

Por consiguiente, las ecuaciones de Navier Stokes están basadas en las ecuaciones constitutivas (estas ecuaciones, establecen una relación directamente proporcional entre el tensor de esfuerzos y el tensor de tasa de deformación del elemento de un fluido.) y la ley de conservación de la cantidad de movimiento. Estas ecuaciones involucran estrechamente parámetros como: Gradiente de velocidad, esfuerzos y un coeficiente de viscosidad λ , donde Stokes supone para líquidos y gases, que el coeficiente de viscosidad es igual a la aproximación de 0.666 veces el valor de la viscosidad dinámica (μ), tomando este resultado siempre como un número negativo (Aponte Pérez, 2017). Finalmente, y con base en lo anterior, las ecuaciones de Navier Stokes, se presentan a continuación.

Ecuación de Navier Stokes-Componente x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_{Mx} \quad (1)$$

Ecuación de Navier Stokes-Componente y

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_{My} \quad (2)$$

Ecuación de Navier Stokes-Componente z

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_{Mz} \quad (3)$$

Aunque las ecuaciones de Navier Stokes, significaron un gran avance para la hidrodinámica, a finales del siglo XX, surgió la necesidad de desarrollar métodos de resolución numérica, dando paso así, a una nueva rama denominada Dinámica de Fluidos Computacional. González-Santander (2014) recalca que antes de finales de los años 60 la única herramienta que se tenía para el análisis y diseño de problemas reales de mecánica de fluidos eran las técnicas experimentales, esto debido a que en aquella época las computadoras no obtenían las velocidades de cálculo que se requerían.

La influencia de las computadoras demostró la eficiencia de los métodos numéricos para resolver problemas no solo de transferencia de calor o especies químicas, sino también problemas orientados hacia la mecánica de fluidos, por medio de ecuaciones diferenciales parciales, cuando tales problemas no pueden resolverse por medio de métodos matemáticos convencionales debido a complejidades en su geometría, condiciones de frontera y no linealidad. Para Xamán (2016) la dinámica de fluidos computacional se refiere a una implementación de técnicas numéricas mediante el uso de computadoras, que se posiciona como una rama de la mecánica de fluidos y cuyo objetivo principal, es la utilización de las computadoras como un

elemento fundamental para resolver numéricamente las ecuaciones de movimiento de fluidos con el fin de poder aplicarlas a problemas reales y de utilidad práctica.

Según Aztroza Salazar (2017), es correcto afirmar que el método de volúmenes finitos (MVF) es muy útil para convertir ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones algebraicas más sencillas que permitan obtener la solución requerida en puntos determinados previamente establecidos.

Por tal razón, las teorías y conceptos que se aplicarán en este trabajo de investigación estarán basadas netamente en las ecuaciones de Navier Stokes, las cuales se resolverán mediante el método de volúmenes finitos, utilizando la herramienta computacional de OpenFOAM, con el fin de simular un vertedero rectangular de pared delgada y doble contracción en el canal horizontal abierto del laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, empleando un software de dinámica de fluidos computacional.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

Este capítulo enmarca conceptos fundamentales para la comprensión del documento y de la investigación que aquí se desarrolla. En este se abarcan los temas primordiales cuyo estudio fue primordial para completar satisfactoriamente este trabajo.

5.2.1 Dinámica de fluidos computacional.

La ingeniería actual plantea problemas que requieren del conocimiento, entendimiento y análisis del flujo de gases o fluidos, muchos de estos problemas no podrían ser resueltos sin la aplicación de la dinámica de fluidos, una disciplina que continúa evolucionando rápidamente y se ha ido estableciendo en el campo de la ingeniería y la ciencia.

La CFD es definida por Versteeg y Malalasekera (2007) como el análisis de sistemas que involucran el flujo de los fluidos, la transferencia de calor y otros fenómenos asociados, tal como las reacciones químicas, a través de simulaciones asistidas por computador. De manera similar, Potter, Wiggert y Ramadan (2011) le definen simplemente como aquella que “se ocupa por obtener soluciones numéricas de problemas de flujos de fluidos mediante la computadora”.

Como se percibe de estas definiciones, la CFD no se trata simplemente de una única disciplina, sino que abarca e integra tres disciplinas individuales: la mecánica de fluidos, las matemáticas y las ciencias computacionales; así Tu, Yeoh y Liu

(2018) argumentan el aporte de cada una de estas: la mecánica de fluidos es el estudio de los fluidos ya sea en movimiento o estáticos, los primeros son la principal materia de estudio de la CFD (fluidos en estado dinámico) y esta disciplina permite el análisis de su comportamiento y su influencia en los distintos procesos como la transferencia de calor; ahora, este comportamiento y las propiedades físicas de los fluidos han de describirse a través de ecuaciones matemáticas, más concretamente ecuaciones diferenciales; finalmente, las ciencias computacionales simplificarán la resolución de dichas ecuaciones usando diferentes lenguajes de programación en programas o paquetes de software que posibilitan simulaciones y arrojan soluciones numéricas.

Es importante resaltar que una simulación es posible gracias al uso de códigos estructurados alrededor de los algoritmos numéricos que pueden abordar los problemas de los mencionados procesos; para Sharma (2016), el desarrollo de estos códigos sigue una metodología numérica que consta de cinco pasos principales: primero, generación de la malla; segundo, método de discretización; tercero, metodología de solución; cuarto, cálculo de parámetros de ingeniería; y quinto, ensayos; que se presentan brevemente a continuación:

- Generación de la malla: Este paso se refiere al pre procesamiento y consiste en un método de subdivisión del dominio en un número fijo de volúmenes de control; los puntos localizados en el centro de estos son llamadas puntos de malla y supone el cálculo de parámetros geométricos.
- Método de discretización: Es un método matemático aproximado consistente en convertir las ecuaciones gobernantes en ecuaciones algebraicas lineales. Esta discretización se puede llevar a cabo mediante alguno de los tres métodos: método de diferencias finitas (FDM), método de los elementos finitos (FEM); y método de los volúmenes finitos (FVM).
- Metodología de solución: Esta metodología consiste en tres pasos: primero, un método de solución que será explícito e implícito o iterativo, dependiendo del estado de estabilidad de la formulación; segundo, un proceso detallado para convertir el método de solución y el algoritmo en un código; y tercero, la solución del algoritmo, consistente en el desarrollo del código.
- Cálculo de los parámetros de ingeniería: Es un post procesamiento consistente en el cálculo de valores locales mediante diferenciación numérica y del valor total a través de una integración numérica. Estos parámetros son obtenidos después de calcular las propiedades del flujo en los primeros tres pasos.

- Ensayos: Consistentes en la validación y verificación de los códigos. Permite una comparación entre los resultados del código desarrollado con los resultados numéricos y experimentales.

5.2.2 Método de los volúmenes finitos.

El método de los volúmenes finitos es un método de discretización utilizado ampliamente en el campo de la ingeniería que se adapta muy bien a simulaciones numéricas de varios tipos. Su nombre, según precisa Mazumder (2016), deriva del hecho de que en este método la ecuación diferencial parcial (EDP) gobernante se satisface en volúmenes de control de tamaño finito, en lugar de en puntos.

Este método requiere de la división del dominio computacional en un conjunto de volúmenes de control conocidos como celdas, las cuales pueden ser de forma y tamaño arbitrarios, aunque, tradicionalmente, las celdas son polígonos convexos (en 2D) o poliedros (en 3D), es decir, están delimitados por bordes rectos (en 2D) o superficies planas (en 3D). Las superficies que delimitan se conocen como caras de celda o simplemente caras; los vértices, por otro lado, se conocen como nodos.

La derivación de las ecuaciones de volumen finito comienza integrando la EDP gobernante sobre las celdas que constituyen el dominio computacional. La EDP gobernante no se resuelve directamente, sino que primero se integra sobre el volumen de control y luego se aproxima y se resuelve. Además, dado que no hay ningún centro de celda ubicado en el límite, las condiciones de límite no se pueden satisfacer directamente. Es por estas razones que la solución a la EDP, obtenida mediante el método de volumen finito, se conoce como solución en forma débil.

Para Kolditz (2002), este método tiene dos ventajas principales: la primera es que impone la conservación de cantidades a nivel discretizado, es decir, la masa, el momento y la energía se conservan también a escala local. Los flujos entre los volúmenes de control contiguos se equilibran directamente. Su segunda ventaja es el aprovechamiento máximo de las mallas arbitrarias para aproximar geometrías complejas.

5.2.2.1 Condiciones de frontera. La naturaleza compleja del comportamiento del flujo de fluidos tiene implicaciones importantes en las que se prescriben condiciones de contorno. Es de gran importancia definir las condiciones apropiadas que imiten correctamente una representación física real del flujo de fluidos. Håkansson, y otros (2011) introducen unas condiciones de frontera que dependen de la condición de flujo:

- Fronteras Inlet (entrada) y Outlet (salida)

La velocidad de entrada se puede definir en términos de velocidades o caudal másico. En la mayoría de los programas de CFD es posible ingresar la condición de

entrada como un flujo promedio perpendicular a la superficie o como una distribución de componentes de velocidad sobre la superficie de entrada. Una alternativa para definir las velocidades de entrada es la condición de límite de entrada de presión que se puede utilizar cuando se conoce la presión de entrada sin conocer el caudal.

La condición de límite de salida estándar es la condición de flujo de difusión cero aplicada en las celdas de flujo de salida, lo que significa que las condiciones del plano de flujo de salida se extrapolan desde dentro del dominio y no tienen impacto en el flujo de aguas arriba. La condición de límite de la salida de presión es a menudo la condición predeterminada que se utiliza para definir la presión estática en las salidas de flujo. El uso de una condición de límite de salida de presión en lugar de una condición de flujo de salida a menudo da como resultado una mejor tasa de convergencia cuando se produce un reflujo durante la iteración.

En ciertos casos, las fronteras de entrada y salida son además periódicas con respecto a la velocidad, así como al gradiente de presión y temperatura (Blazek, 2001).

- Frontera Wall (pared)

Esta condición de frontera se emplea para unir regiones sólidas y fluidas. La condición límite habitual para la velocidad en las paredes es la "condición de no deslizamiento", es decir, la velocidad relativa entre la pared y el fluido se establece en cero.

Para un modelo libre de turbulencia, lo natural es seleccionar condiciones de frontera $k = 0$ y $\varepsilon = 0$ pero esos deben ser considerados en modelos de turbulencia. Rara vez se cuentan con mediciones de estos valores por lo cual Versteeg, y otros (2007) presentan las siguientes ecuaciones para su aproximación:

$$k = \frac{3}{2}(U * Ti)^2 \quad \varepsilon = Cu^{\frac{3}{4}} \left(\frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \right) \quad l = 0.07 * L \quad Ti = 0.16 * Re^{-\frac{1}{8}} \quad (4)$$

Donde:

U = Velocidad del fluido m/s^2 .

Ti = Intensidad de turbulencia.

Cu = Constante=0.09.

L = Profundidad hidráulica m .

Re = Número de Reynolds.

l = Escala de longitud turbulenta

Ti = Intensidad de turbulencia.

5.2.3 OpenFOAM.

Como se ha mencionado anteriormente, en la actualidad existen múltiples programas que permiten la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, uno de ellos es OpenFOAM, un software de uso libre y código abierto que se distribuye bajo una licencia pública general. OpenFOAM se basa en el método de los volúmenes finitos y el uso de módulos en C++ que permiten una sencilla creación de solucionadores numéricos personalizados que facilitan la simulación de problemas de CFD. Además de los solucionadores, el software proporciona una herramienta para el procesamiento posterior llamada Paraview, y también permite el uso de herramientas o utilidades desarrolladas por otros usuarios (The OpenFOAM Foundation, 2011).

5.2.3.1 Modelo de turbulencia – Modelo RANS. Además de los solucionadores y las utilidades, OpenFOAM se distribuye con numerosas bibliotecas estándar, las cuales abordan tanto algoritmos numéricos como de física básica, los últimos incluyen los modelos de turbulencia.

Dado que la mayoría de las soluciones exactas de las ecuaciones Navier Stokes no están disponibles, Chen, Goong, y otros (2014) resaltan la necesidad de confiar en métodos numéricos para encontrar soluciones aproximadas. El cálculo de tales soluciones sin la introducción de aproximaciones adicionales, excepto las asociadas con los algoritmos numéricos, se conoce comúnmente como Simulación Numérica Directa (DNS), sin embargo, las soluciones numéricas obtenidas mediante DNS tienen una utilidad bastante limitada, la razón es que los fluidos presentan un comportamiento turbulento y dado que la DNS requiere que se capturen adecuadamente todas las estructuras turbulentas significativas (esto es que, el dominio del cual se realiza el cálculo debe adaptarse al remolino turbulento más pequeño y más grande), su uso puede ser muy costoso (Heng Yeoh, y otros, 2018).

La turbulencia se caracteriza por fluctuaciones rápidas e irregulares en las propiedades de los fluidos con una amplia gama de escalas de duración y tiempo. Para superar esta limitación, los investigadores han recurrido a diferentes niveles de aproximación. Esto se conoce como modelado de turbulencia, de acuerdo a Chen, Goong, y otros, los dos enfoques más utilizados son el modelo de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (RANS) y modelo de turbulencia tipo les (LES).

Los métodos RANS se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo o en conjunto. Este proceso da como resultado la aparición de términos adicionales que involucran el promedio de productos de la velocidad fluctuante, denominados esfuerzos de Reynolds. Deben desarrollarse ecuaciones para describir los esfuerzos y, por lo general, son ecuaciones diferenciales. La mayoría de los modelos RANS se basan en el concepto de viscosidad o viscosidad turbulenta. Este es un coeficiente de difusión, equivalente a la viscosidad cinemática del fluido, que describe la mezcla turbulenta o la difusión del momento. Implica el producto de una velocidad turbulenta característica y una escala de longitud. Los modelos de turbulencia de dos ecuaciones, como el modelo $k-\epsilon$, proporcionan estas escalas.

- **Modelo $k-\epsilon$ estándar.** El modelo $k-\epsilon$ resuelve la ecuación de transporte básica para la energía cinética turbulenta y la disipación. Es uno de los modelos de turbulencia más conocidos y suele implementarse en los códigos del software de CFD. Se considera un modelo confiable y estable, siendo muy bueno en términos de precisión para problemas generales de flujo en ingeniería (Minkowycz, y otros, 2017).

De este modelo existen varias versiones modificadas, entre las que se encuentra el modelo $k-\epsilon$ realizable que contiene una formulación para la viscosidad turbulenta y otra ecuación de transporte para la tasa de disipación, que se derivó de la ecuación exacta para el transporte de la fluctuación de la velocidad cuadrática media. Realizable, aclara Brebbia (2016), significa que el modelo satisface ciertas restricciones matemáticas sobre las tensiones de Reynolds consistentes con la física de flujo turbulento.

Por ahora, la consulta en la literatura muestra que se sigue prefiriendo el modelo estándar debido a su robustez.

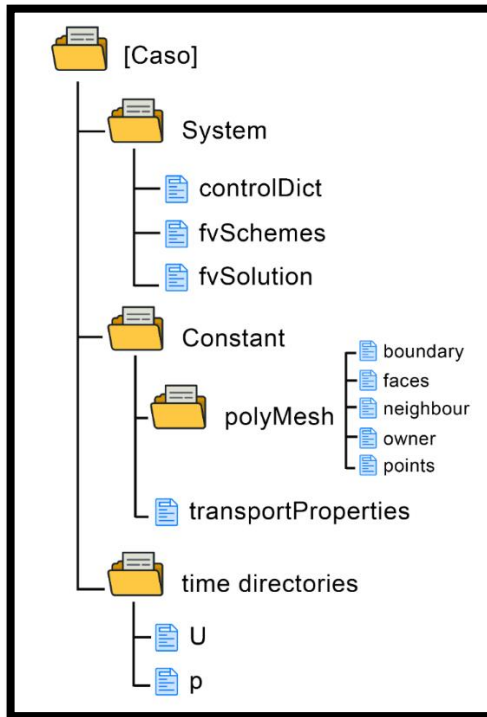
OpenFOAM dispone de diferentes solucionadores para la resolución de las ecuaciones del modelo RANS, el usuario debe escoger aquel que se adapte al problema a resolver.

InterFoam es uno de los solucionadores proporcionados para problemas de flujos multifásicos, y trabaja con dos fluidos incompresibles, inmiscibles e isotérmicos empleando un enfoque de captura de interfaz basado en el método de volumen de fluido - VOF* (OpenCFD Ltd, 2016).

* Indica si la celda del volumen del control está ocupada por líquido y/o gas (Heng Yeoh, y otros, 2018).

5.2.3.2 Modelo en OpenFOAM. Toda simulación de un problema en OpenFOAM requiere de 3 directorios principales que contienen los archivos necesarios para correrla. La Figura 1 muestra la estructura básica, según la describe Kleinstreuer (2018).

Figura 1. Estructura básica de un caso en OpenFOAM.



Fuente: Adaptado de (OpenCFD Ltd, 2016).

- Directorio System. Contiene 3 archivos: controlDict, donde se incluyen los parámetros de control del tiempo de ejecución, como la hora de inicio, la hora de finalización y el intervalo de escritura; fvSchemes, donde se seleccionan los esquemas de discretización; y fvSolution, donde se establecen los solucionadores de ecuaciones, tolerancias y algoritmos.
- Directorio Constant. Contiene un subdirectorio llamado polyMesh que contiene toda la información de la malla. Adicionalmente, tiene un archivo que determina las propiedades de transporte, donde se establecen las propiedades físicas del fluido como viscosidad cinemática, densidad, difusividad térmica, etc.

- Directorios de tiempo. Incluye las condiciones iniciales para la ejecución de la simulación. Cada uno de los archivos, nombrados a partir de las propiedades del fluido, establece las condiciones para cada una de estas.

La simulación requiere también de una malla, usada por el solucionador para la construcción de los volúmenes de control. Esta malla representa la geometría del caso a ejecutar y está usualmente descompuesta en una serie de parches al que se le asigna un tipo como parte de la descripción de la malla y que le restringe geométricamente. Siguiendo la guía del usuario de OpenFOAM (2020), algunos de estos tipos de parche se listan a continuación:

- patch: Es un parche genérico que no contiene información geométrica ni topológica.
- wall: Para aquellos que coinciden con paredes sólidas.
- cyclic: Permite que dos parches se traten como si estuviesen físicamente conectados, útil para geometrías repetidas.
- empty: Para soluciones 1D/2D

OpenFOAM ofrece un gran rango de condiciones de frontera básicas consolidadas de acuerdo a alguno de estos grupos:

- | | |
|---------------|-----------|
| ▪ Constraints | ▪ Outlet |
| ▪ General | ▪ Wall |
| ▪ Inlet | ▪ Coupled |

Las condiciones de frontera básicas que ofrece OpenFOAM son: *calculated*, *fixedValue*, *fixedGradient*, *zeroGradient*, *mixed*, *directionMixed* y *extrapolatedCalculated*. Existen numerosas condiciones de frontera más complejas que se derivan de estas, pueden ser consultadas en la guía del usuario del software.

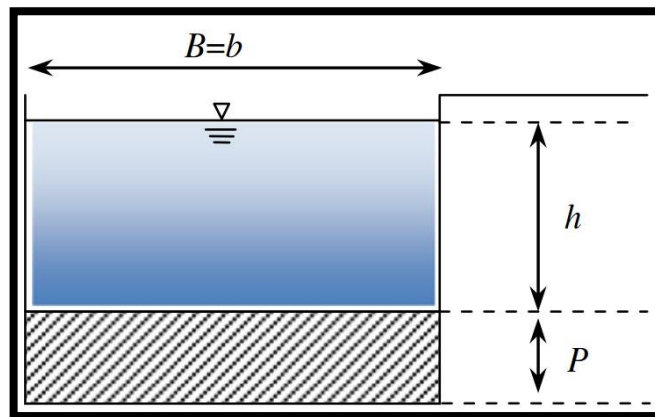
En los softwares que aplican conceptos de la dinámica de fluidos computacional (CFD), es posible simular varias condiciones de flujo para estructuras hidráulicas tales como: Vertederos, alcantarillas y canaletas. Lozano (2016) describe un vertedero como una estructura hidráulica con una abertura que permite la medición del caudal, diseñada para impulsar el flujo aguas arriba, proporcionando un cambio de nivel suficiente para que el agua en curso se vierta o desagüe sobre la obra. Los vertederos pueden ser clasificados según la forma de su abertura, la forma de la cresta, el efecto que tienen sus lados en la lámina de agua y de acuerdo a la naturaleza de la descarga. Las siguientes son las clasificaciones según Bansal (2005):

- De acuerdo a la forma de su abertura: Rectangulares, triangulares y trapezoidales.

- De acuerdo a la forma de la cresta: De placa delgada o cresta afilada, de cresta ancha, de cresta delgada y de perfil Ogee.
- De acuerdo al efecto que tienen sus lados en la lámina de agua: Con y sin contracciones.
- De acuerdo a la naturaleza de la descarga: Sumergido o ahogado.

Los vertederos rectangulares son los más utilizados en la práctica y son los más simples. Puede darse el caso de que estos tengan contracciones laterales o no. La Figura 2 muestra el esquema de un vertedero rectangular sin contracciones según Bagheri y Heidarpour (2009).

Figura 2. Vertedero rectangular.



Fuente: Bagheri y Heidarpour (2009).

Donde b es el ancho del vertedero, P es la altura del vertedero y h es la carga sobre la cresta.

5.2.4 Número de Courant y Estabilidad del modelo.

Como afirman Heng, y otros (2018), una de las mayores preocupaciones en cuanto a las soluciones numéricas es si se puede garantizar que la solución se aproxima a la solución exacta, y de ser así, bajo qué condiciones. Esto se puede resolver con la convergencia, sin embargo, esta no es fácil de establecer por lo cual se emplean otros aspectos, como la estabilidad, que implican una consideración indirecta de la convergencia.

La estabilidad numérica del modelo está dada por lo que se conoce como la condición Courant–Friedrichs–Lewy o la condición CFL:

$$Co = \frac{U\Delta t}{\Delta x} \text{ y debe satisfacerse que } Co < 1 \text{ o } \Delta t < \frac{\Delta x}{U} \quad (5)$$

La expresión de arriba es lo que comúnmente se denomina como número de Courant y expresa que la distancia recorrida por la información en un intervalo de tiempo debe ser menor a la distancia entre los elementos de la malla, es decir, esta información no debe moverse más de una longitud de celda en un solo intervalo (Ferziger, y otros, 2012).

5.2.5 Evaluación de resultados.

Para evaluar los resultados obtenidos mediante una simulación respecto a aquellos obtenidos de manera experimental, se puede hacer una valoración de la bondad de ajuste entre ellos a través de cinco criterios estadísticos: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, coeficiente de correlación, raíz del error cuadrático medio, error porcentual absoluto medio y error absoluto medio.

- El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) describe qué tan bien se está simulando el flujo del agua con el modelo. El valor del NS oscila entre 0 y 1, donde 1 indica un ajuste perfecto entre lo observado y modelado. Tiene la forma de:

$$NS = \frac{\sum_{i=1}^n (Xs_i - Xo_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Xo_i - Xo_{prom})^2} \quad (6)$$

Donde NS= coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe; Xs_i = variable simulada; Xo_i = variable observada; Xo_{prom} = promedio de variable observada; y n= número de datos (Tournier, y otros, 2019).

Tabla 1. Categorías de rendimiento del modelo para indicar el nivel de bondad - NSE

Rango	Categoría de calidad del modelo
> 0.85	Excelente
0.65 - 0.85	Muy bueno
0.50 - 0.65	Bueno
0.20 - 0.50	Satisfactorio / pobre
< 0.20	Insatisfactorio / muy pobre

Fuente Adaptado de (Świątek, y otros, 2011).

- Coeficiente de determinación (R^2) mide la proporción de la variabilidad en respuesta una variable explicada por el modelo de regresión. El valor del R^2 explica qué tan bien el modelo explica los valores de la variable dependiente, entre más cercano es el R^2 a 100%, mejor explica los datos de respuesta en torno a su media (Nwanganga, y otros, 2020).

$$R^2 = \frac{\text{Variación explicada}}{\text{variación total}} \quad (7)$$

La tabla a continuación, muestra los valores de referencia para evaluar el desempeño del modelo mediante este criterio.

Tabla 2. Categorías de rendimiento del modelo para indicar el nivel de bondad – R^2

Rango	Categoría de calidad del modelo
99 - 100	Excelente
95 - 99	Muy bueno
90 - 95	Bueno
85 - 90	Suficientemente bueno
80 - 85	Medio
70 - 80	Satisfactorio / pobre
< 70	Insatisfactorio / muy pobre

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) se usa para medir la diferencia entre el valor observado y el modelo, cuanto más pequeño es un valor RMSE, más cercanos son los valores predichos y observados (Tournier, y otros, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F - O)^2} \quad (8)$$

Donde F= valor del modelo; O= valor observado; y n= número de datos. Se recomienda que el valor del RMSE no supere 0,20.

- Error porcentual absoluto medio (MAPE, por sus siglas en inglés) es el promedio del error porcentual absoluto de los pronósticos y en la Enciclopedia de gestión de producción y fabricación (2000) se le define como el valor real u observado menos el valor pronosticado.

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \quad (9)$$

Donde x_i es el valor real observado; \hat{x}_i es el valor estimado: y N es el número de observaciones. Entre menor sea el MAPE, mejor será la estimación. Tiene la desventaja de ser indefinido cuando $x_i=0$ y si algún valor verdadero está muy cerca de cero, los errores porcentuales absolutos correspondientes serán extremadamente altos y, por lo tanto, sesgarán su evaluación (Hyndman, y otros, 2006).

- Error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés) es la métrica de regresión más simple, consiste en un promedio de las diferencias absolutas entre los valores esperados y las predicciones (Singh, 2016).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|$$

Donde x_i es el valor real observado; \hat{x}_i es el valor estimado: y N es el número de observaciones. Pequeños valores de MAE sugieren que el modelo es muy bueno.

6. METODOLOGÍA

En este capítulo, se describen una a una, las etapas que se desarrollaron para obtener los objetivos planteados en la fase inicial de este proyecto.

- Etapa 1 -Trabajo de laboratorio.

En esta etapa, se desarrollaron una serie de procesos que incluían la recolección, clasificación, organización, análisis e interpretación de múltiples ensayos de laboratorio referentes a la práctica “Aforadores de caudal”, realizada por varios grupos de estudiantes de la Universidad Católica de Colombia, en sus prácticas de cátedra, entre 2018 y 2019.

La información recolectada se filtró, de manera que solamente se usaron los datos correspondientes al vertedero sin contracción, dentro de los cuales se encontraban mediciones de volumen en litros, tiempo en segundos y dimensiones del vertedero en milímetros.

Se reunió un total de siete (7) ensayos de laboratorio, estos se consolidaron en cinco grupos según el caudal con el fin de analizar la precisión de los datos tomados en la altura de la lámina de agua sobre el vertedero; al observarse semejanza en los resultados registrados, y procurando evitar la propagación de errores al realizar un promedio, se tomó la decisión de trabajar únicamente con los datos propios (de las autoras).

La práctica de laboratorio, realizada en noviembre de 2019, se desarrolló como sigue:

- En el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia se encuentra un canal rectangular de 4.90m de longitud, 0.075m de ancho y 0.25m de alto, en donde se instaló, a 2.50m de su inicio, un vertedero rectangular sin contracción de pared delgada de 0.075m de ancho por 0.12m de alto con un espesor de 0.006m.
- Posteriormente, se encendieron las bombas y se dio apertura a la válvula reguladora de caudal para permitir el paso controlado del agua.

- Se situó el limnómetro en el punto de interés (cresta del vertedero) y se midió la altura de la lámina de agua sobre este; el anterior procedimiento se repitió 8 veces, realizando variaciones de caudal para cada repetición.

Con la ecuación de calibración se calcularon dos alturas adicionales, que constituyen los grupos VI y VII (referidos en la Tabla 3), con el fin de evaluar el modelo para caudales menores. Los datos consignados durante esta práctica fueron la base para calcular otras variables relevantes en los procesos de las etapas subsiguientes para la programación y simulación del modelo en OpenFOAM.

▪ Etapa 2 – Configuración del modelo en OpenFOAM.

- a) Pre-procesamiento: Para la configuración del modelo en OpenFOAM, se hizo necesario en primer lugar, la representación geométrica tanto del canal como del vertedero, la generación de la malla y la definición de las condiciones de frontera con ayuda del software auxiliar Salome-Meca.

Para la representación geométrica, se implementó un sistema de coordenadas con el fin de ubicar espacialmente cada punto que componen los elementos. A fin de obtener la malla, fue necesario, además de la geometría, fijar las restricciones que determinan el comportamiento del modelo, conocidas también como *condiciones de frontera* del proyecto, definidas para este caso como: inlet (entrada del agua), outlet (salida del agua), wall (paredes laterales y fondo del canal) y atmosphere (parte superior del canal a flujo libre).

Se generó un mallado hexaédrico para tres mallas con diferente tamaño de celdas: la primera tiene un tamaño de 0.01m mientras que la segunda cuenta con celdas de 0.03m y la última con celdas de 0.05m. Se exportaron en formato .UNV con el fin de tener la base de la simulación lista para trabajar en OpenFOAM.

- b) Procesamiento: La simulación en OpenFOAM requiere de 3 carpetas principales y la malla en formato .UNV.
 - Carpeta 0: Esta carpeta contiene los archivos que permiten configurar en el modelo las propiedades del fluido como densidad, velocidad,

turbulencia y energía de turbulencia, así como las condiciones iniciales y de frontera para el tiempo cero.

- Carpeta Constant: Esta carpeta contiene los parámetros de propiedades de transporte, propiedades de turbulencia, gravedad y una subcarpeta denominada “Polymesh” que contiene toda la información de la malla.
- Carpeta System: Esta carpeta contiene los parámetros de tiempo de duración de la simulación, intervalos, volumen inicial y la configuración del solucionador.

c) Post-procesamiento: La visualización de los resultados se obtuvo a través de la aplicación ParaView, en donde fue posible extraer la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero a través del tiempo, de la misma manera permitió observar la velocidad sobre esta y la generación de los perfiles de velocidad.

Etapa 3 – Análisis de escenarios:

Como complemento al desarrollo del objetivo inicial, se hizo un análisis de dos casos hipotéticos a partir de la geometría del vertedero; se trabajó con un vertedero rectangular de una contracción y un vertedero rectangular de dos contracciones, tomando tres caudales intermedios de los cinco grupos del caso base y haciendo las simulaciones correspondientes, obteniendo así tres simulaciones para cada uno de estos vertederos, bajo las mismas condiciones del vertedero sin contracción.

Etapa 4 – Validación del modelo y comparación de resultados.

Para evaluar la eficiencia del modelo, se emplearon 5 criterios estadísticos que permitieron la comparación de los resultados del modelo físico descrito en la etapa 1 con los resultados del modelo computacional descrito en la etapa 2-c.

El análisis estadístico se realizó utilizando: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), error absoluto medio (MAE), error porcentual absoluto medio (MAPE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2).

Finalmente, se compararon los datos numéricos y gráficos, en donde fue posible evaluar el comportamiento del flujo para cada tipo de vertedero, y el impacto que tiene la geometría del mismo en la velocidad del flujo y la altura de la lámina de agua sobre la cresta.

7. APLICACIÓN DEL MODELO EN OPENFOAM

En este capítulo, se explica de manera detallada el desarrollo del proyecto desde su etapa inicial, pasando por la agrupación y elección de los datos base, la creación de las diferentes geometrías con sus respectivas mallas, la configuración de los archivos de acceso público contenidos en las bibliotecas de OpenFOAM y adaptados a las necesidades de nuestro modelo, la delimitación de las condiciones de frontera y volumen inicial, las propiedades de transporte, tiempo y número de intervalos de tiempo y, finalmente, la correcta ejecución de nuestro modelo base y los modelos hipotéticos.

7.1 AGRUPACIÓN Y SELECCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

Como consecuencia de la pandemia ocasionada por el Covid-19, no fue posible realizar ensayos de laboratorio exclusivos para el uso de este proyecto, de tal forma que se tuvo que recurrir al trabajo de laboratorio realizado durante las clases de hidráulica y laboratorio de la Universidad Católica de Colombia por parte de sus estudiantes, incluyendo a las autoras.

Por lo anterior, se procedió a recolectar los datos en cinco grupos de modelación, dependientes del caudal con un parámetro comparativo referente a la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero; después de analizar estos datos y revisar que efectivamente fueran similares, se tomó la decisión de trabajar con los datos del laboratorio de fuente propia de las autoras, con el fin de evitar la propagación o acumulación de errores que generaría trabajar con un promedio de los datos de varios laboratorios desarrollados por diferentes personas. Una vez elegidos los datos, se procedió a generar la curva de calibración del vertedero, cuya ecuación fue la pauta para calcular los datos de dos grupos adicionales, con el fin de obtener un total de siete grupos de modelación.

La Tabla 3. Agrupación y selección de datos experimentales muestra la agrupación de datos de cuatro ensayos distintos con una letra asignada a la identidad de cada autor. Las filas y celdas resaltadas, corresponden a los caudales y alturas de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero elegidos como punto de partida para los cálculos, configuraciones y simulación del modelo.

Tabla 3. Agrupación y selección de datos experimentales

Grupo I				Grupo II				Grupo III				Grupo IV			
Dato N°	Q(m³/s)	H(m)	Lab	Dato N°	Q(m³/s)	H(m)	Lab	Dato N°	Q(m³/s)	H(m)	Lab	Dato N°	Q(m³/s)	H(m)	Lab
1	0,0022	0,0573	A	1	0,0017	0,0480	A	1	0,0015	0,0450	A	1	0,0010	0,0350	A
2	0,0020	0,0510	D	2	0,0017	0,0474	D	2	0,0015	0,0430	E	2	0,0013	0,0385	D
3	0,0021	0,0570	B	3	0,0018	0,0500	E	3	0,0015	0,0400	D	3	0,0009	0,0325	B
4	0,0020	0,0545	C	4	0,0018	0,0512	B	4	0,0015	0,0427	C	4	0,0011	0,0370	E
Promedios	0,00209	0,055		Promedios	0,00177	0,049		Promedios	0,00148	0,043		Promedios	0,001069	0,036	

Grupo V				Grupo VI		Grupo VII	
Dato N°	Q(m³/s)	H(m)	Lab	Q(m³/s)	H(m)	Q(m³/s)	H(m)
1	0,0007	0,0290	A	0,00025	0,01467	0,00015	0,01064
2	0,0007	0,0355	F				
3	0,0008	0,0260	G				
4	0,0007	0,0264	D				
Promedios	0,000731	0,029					

Laboratorio	Autor
A	Propio
B	Jessica Cuellar
C	Junior Duarte
D	Robinson Builes
E	Laura Angulo
F	Angela Carvajal
G	Cristian Marroquín

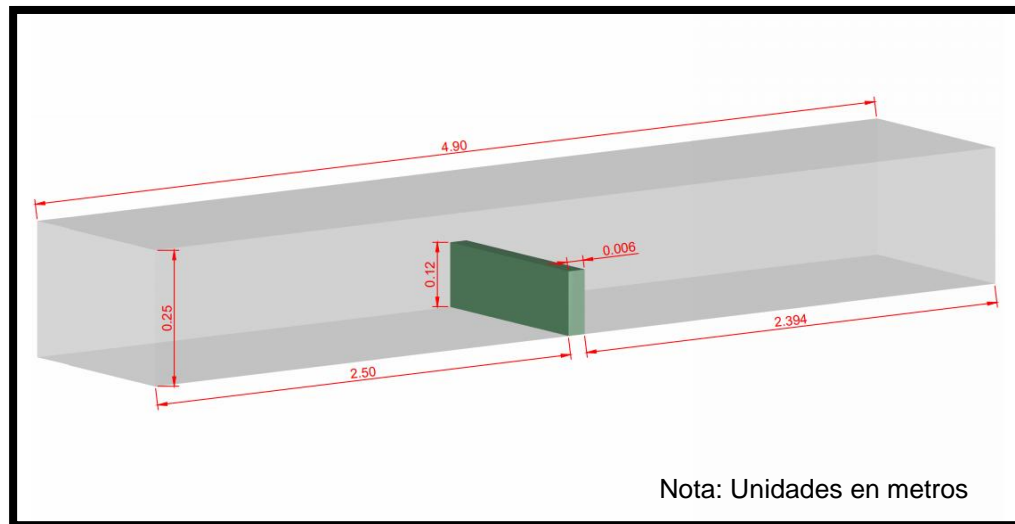
Fuente Elaboración propia.

7.2 DISEÑO DE GEOMETRÍA Y CREACIÓN DE MALLA

El diseño de la geometría del canal horizontal, del vertedero rectangular y la creación de las mallas correspondientes a cada caso de estudio, se elaboraron con ayuda del software auxiliar Salome-Meca.

Para el caso de la geometría del canal horizontal, se trabajó una sola figura a lo largo de todo el proyecto, con medidas reales que fueron una fiel representación del canal horizontal existente en la Universidad Católica de Colombia y en el cual se realizaron todos los ensayos y mediciones utilizadas para llevar a cabo este proyecto. (Ver Figura 1).

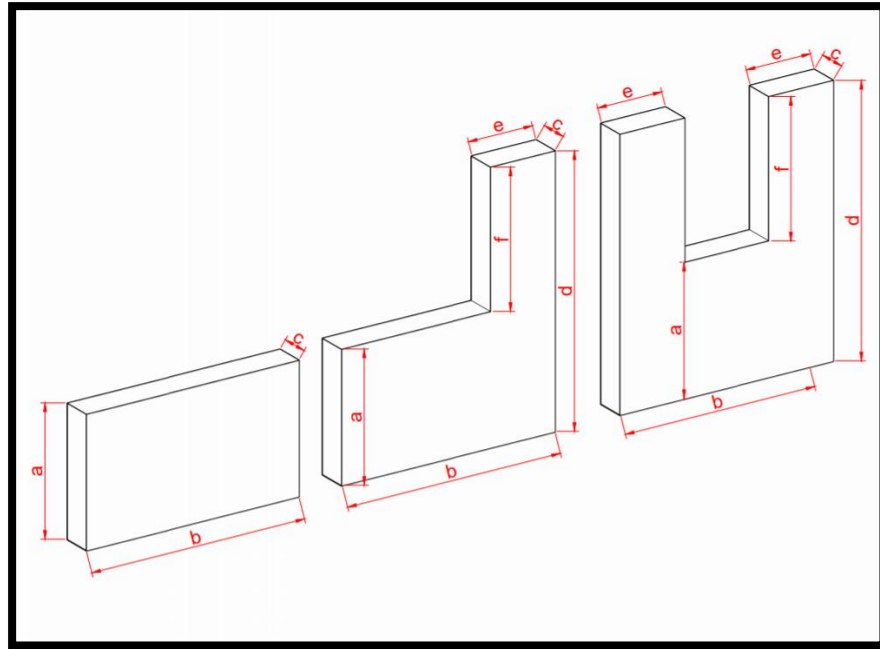
Figura 3. Geometría del canal horizontal y vertedero de una contracción.



Fuente Elaboración propia.

La geometría de los vertederos fue diferente para cada caso de simulación (sin contracción, una contracción y dos contracciones), se diseñaron tres mallas para el modelo principal referente al vertedero rectangular sin contracciones con tamaños de 0.01m, 0.03m y 0.05m; después de elegir la malla más conveniente para la precisión del modelo, se diseñaron dos mallas más del mismo tamaño (0.05m) para los casos de simulación hipotéticos con el vertedero de una contracción y el vertedero de dos contracciones (Figura 3).

Figura 4. Vertederos sin contracción, con una contracción y con dos contracciones.



Fuente Elaboración propia.

Las dimensiones y partes de cada uno de los vertederos del caso, se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 4. Partes y dimensiones de los vertederos sin contracción, con una contracción y con dos contracciones.

ID	Nombre	Dimensiones (m)		
		Sin contracción	Una contracción	Dos contracciones
a	Altura de la cresta	0.120	0.120	0.120
b	Ancho del vertedero	0.075	0.075	0.075
c	Espesor de la cresta del vertedero	0.006	0.006	0.006
d	Altura del vertedero	N/A*	0.240	0.240
e	Ancho de la contracción	N/A	0.025	0.025
f	Altura de la contracción	N/A	0.120	0.120

*N/A: No aplica

Fuente Elaboración propia.

Conociendo la necesidad de cada caso de modelación y con base en la geometría anterior para cada vertedero, se diseñaron las mallas de diferente tamaño (0.01m, 0.03m y 0.05m), con el fin de dividir la geometría en muchos elementos que son usados por el solucionador *InterFoam* con el objetivo de resolver las ecuaciones del

modelo *RANS* y de esta manera poder definir cuál de los tamaños de malla diseñados es más conveniente y más preciso a la hora de representar el modelo y correr la simulación. Para la creación de una malla en 3D, es necesario definir para cada dimensión un algoritmo e hipótesis específicos; para este caso, se diseñó una malla tipo “*Hexahedron*” con algoritmo e hipótesis en una dimensión de *Wire discretisation* y *Local lenght* respectivamente, para dos dimensiones un algoritmo tipo *Quadrangle (Mapping)* y una hipótesis *Quadrangle parameters*→*Standard* y para tres dimensiones un algoritmo tipo *Hexahedron (i, j, k)*.

Posterior al proceso de generación de la malla en el software auxiliar Salome-Meca, se importó la malla a *OpenFoam*, siguiendo este procedimiento:

7.1. Se crea una carpeta del caso de simulación que se quiera representar.

7.2. Se debe exportar la malla desde el software Salome-Meca en formato *.unv (Mesh_3.unv)*, se guarda en la carpeta específica del caso de interés.

7.3. Se guardan dentro la carpeta principal, los directorios contenidos en las bibliotecas de OpenFOAM, correspondientes a 0, constant y system y se modifican sus parámetros de acuerdo a los cálculos realizados.

7.4. Se abre la carpeta principal en la terminal y se escribe:

ideasUnvToFoam Mesh_3.unv

7.5. Se genera automáticamente la carpeta *polymesh* que contiene los archivos *boundary*, *points*, *faces*, *neighbour* y *owner* y en el archivo *boundary*, deben modificarse las condiciones de frontera para cada caso teniendo en cuenta cambiar en *wall* la opción *patch* por la opción *wall*.

7.6. En la terminal se escribe lo siguiente:

checkMesh

con el fin de que el software OpenFOAM haga un proceso de verificación de la malla y finalmente determine si es posible usarla (*Mesh Ok*) o si por el contrario presenta errores, caso en el cual se debe hacer un chequeo de la geometría y los parámetros de creación de la malla.

7.7. Finalmente, para visualizar la malla se escribe en la terminal: “paraFoam”.

Al escribir el comando “*checkMesh*”, además de verificar si la malla tiene errores o no, se obtienen las características de la malla creada como se muestra a continuación:

Tabla 5. Características de las mallas creadas según tamaño, para los vertederos sin contracción, con una contracción y con dos contracciones.

Características	Sin contracción			Una contracción (0.05m)	Dos contracciones (0.05m)
	Malla 1 (0.01m)	Malla 2 (0.03m)	Malla 3 (0.05m)		
Número de puntos	115128	6640	2100	2400	3200
Número de caras	310799	15344	4353	5042	7215
Número de caras internas	277825	11314	2739	3220	5169
Número de celdas	98104	4443	1182	1377	2064
Número de caras por celda	6	6	6	6	6
Número de condiciones de frontera	4	4	4	4	4
Número de celdas hexaédricas	98104	4443	1182	1377	2064

Fuente Elaboración propia.

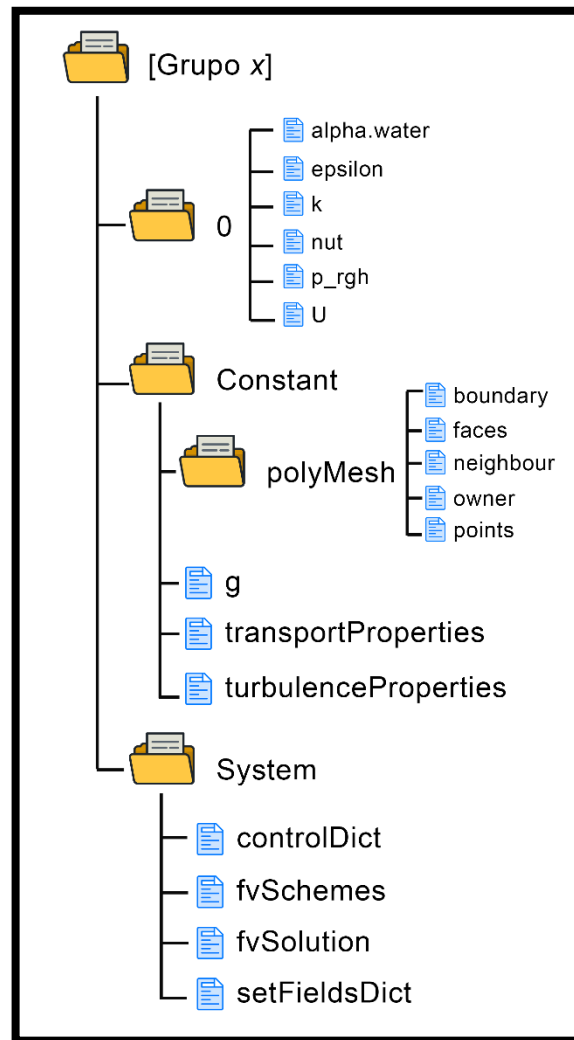
7.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN OpenFOAM

Para ejecutar el modelo en el software de OpenFOAM, se calcularon varios parámetros requeridos para realizar las configuraciones de las condiciones iniciales y condiciones de frontera en los directorios contenidos en la carpeta principal (0, constant y system).

En la Figura 5 se muestra un esquema de la estructura de la carpeta principal con cada uno de sus directorios, subcarpetas y archivos modificables para la representación mediante la dinámica de fluidos computacional, de un canal horizontal con un vertedero rectangular sin contracción, de una contracción y de dos contracciones.

Al momento de ejecutar simulaciones con diferentes características hidráulicas, geométricas y/o topológicas, la estructura de la carpeta principal, directorios y archivos, no cambia de un modelo a otro; por el contrario, el contenido de los archivos modificables existentes en cada directorio o subcarpeta sí se modifican según la necesidad del caso.

Figura 5. Estructura de carpetas y subcarpetas con archivos modificables para una simulación en OpenFOAM.



Fuente Elaboración propia.

Los parámetros modificados para el directorio 0, hacen referencia a la velocidad “ U ”, definida como el espacio recorrido por el flujo de agua en un periodo determinado de tiempo, a la energía cinética turbulenta “ k ”, cuyo cálculo resulta del desarrollo de una serie de ecuaciones previas como el área mojada de la sección transversal del flujo, la velocidad, el número de Reynolds, la intensidad turbulenta y la escala de longitud turbulenta; también se modificó la variable de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, más conocida como “ ϵ ”. Es válido aclarar que, la velocidad es 0 m/s en la entrada de agua al canal para un tiempo 0s.

En el directorio “system”, los archivos modificados fueron “controlDict” y “setFieldsDict”. Para el primero, fue posible configurar la simulación con un tiempo de inicio (startTime) de 0s y un tiempo de finalización de la simulación (endTime) de 20s, lo que resulta un tiempo suficiente para que el flujo se estabilice y permita sacar datos y resultados finales más precisos; además en este directorio, se indicó el valor writeInterval cuyo objetivo dentro de la simulación, fue fijar el intervalo de tiempo para la generación de las carpetas finales que componen la misma; por último dentro de este archivo, se modificó también la línea “maxCo”, referente al máximo número de Courant permitido durante toda la simulación, el cual se fijó en uno, con la condición especial de que este valor en cada modelación no excediera la unidad, con el fin de garantizar la precisión del modelo. En las tablas número 6, 7 y 8, se muestran los diferentes resultados de las variables calculadas, para los diferentes tamaños de malla diseñados.

Para el caso del archivo “setFieldsDict”, se modificó principalmente la característica “boxToCell” con la que se buscó indicar al programa que se ejecute con un volumen inicial de agua para disminuir el tiempo computacional y de simulación; así las cosas, en esta casilla se especificaron las coordenadas de inicio del volumen correspondientes a (0, 0, 0) y las coordenadas donde se desea que finalice el volumen de agua, correspondientes a (2.5, 0.075, 0.12). Todas las medidas están expresadas en sistema internacional (SI).

Tabla 6. Cálculo de las variables para la configuración del modelo - Malla 0.01m

Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
Q (m³/s)	0.00219	0.00171	0.00150	0.00101	0.00073	0.00025	0.00015
L (m)	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000
B (m)	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500
A (m²)	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900
U (m²/s)	0.24360	0.18991	0.16716	0.11239	0.08111	0.02778	0.01667
v (m²/s)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Re	28943.069	22563.607	19860.411	13353.719	9636.927	3300.330	1980.198
T_i	0.04430	0.04570	0.04644	0.04880	0.05083	0.05812	0.06195
I (m)	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840
C_u	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000
k (m²/s²)	0.00017	0.00011	0.00009	0.00005	0.00003	3.91x10 ⁻⁶	1.6x10 ⁻⁶

Tabla 6. Continuación

Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
ε (m²/s³)	0.00005	0.00002	0.00002	0.00001	2.52x10 ⁻⁶	1.51x10 ⁻⁷	3.96x10 ⁻⁸
Δt (s)	0.04000	0.05000	0.05900	0.08800	0.12000	0.35000	0.59000

Fuente Elaboración propia.

Tabla 7. Cálculo de las variables para la configuración del modelo - Malla 0.03m

Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
Q (m³/s)	0.00219	0.00171	0.00150	0.00101	0.00073	0.00025	0.00015
L (m)	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000
B (m)	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500
A (m²)	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900
U (m²/s)	0.24360	0.18991	0.16716	0.11239	0.08111	0.02778	0.01667
v (m²/s)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Re	28943.069	22563.607	19860.411	13353.719	9636.927	3300.330	1980.198
T_i	0.04430	0.04570	0.04644	0.04880	0.05083	0.05812	0.06195
I (m)	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840
C_u	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000
k (m²/s²)	0.00017	0.00011	0.00009	0.00005	0.00003	3.91x10 ⁻⁶	1.6x10 ⁻⁶
ε (m²/s³)	0.00005	0.00002	0.00002	0.00001	2.52x10 ⁻⁶	1.51x10 ⁻⁷	3.96x10 ⁻⁸
Δt (s)	0.12300	0.15500	0.17800	0.26500	0.36900	1.08000	1.79000

Fuente Elaboración propia.

Tabla 8. Cálculo de las variables para la configuración del modelo - Malla 0.05m

Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
Q (m³/s)	0.00219	0.00171	0.00150	0.00101	0.00073	0.00025	0.00015
L (m)	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000	0.12000
B (m)	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500	0.07500
A (m²)	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900	0.00900
U (m²/s)	0.24360	0.18991	0.16716	0.11239	0.08111	0.02778	0.01667
v (m²/s)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	2.52x10 ⁻⁶	0.00000	0.00000
Re	28943.06	22563.60	19860.411	13353.719	9636.927	3300.330	1980.198

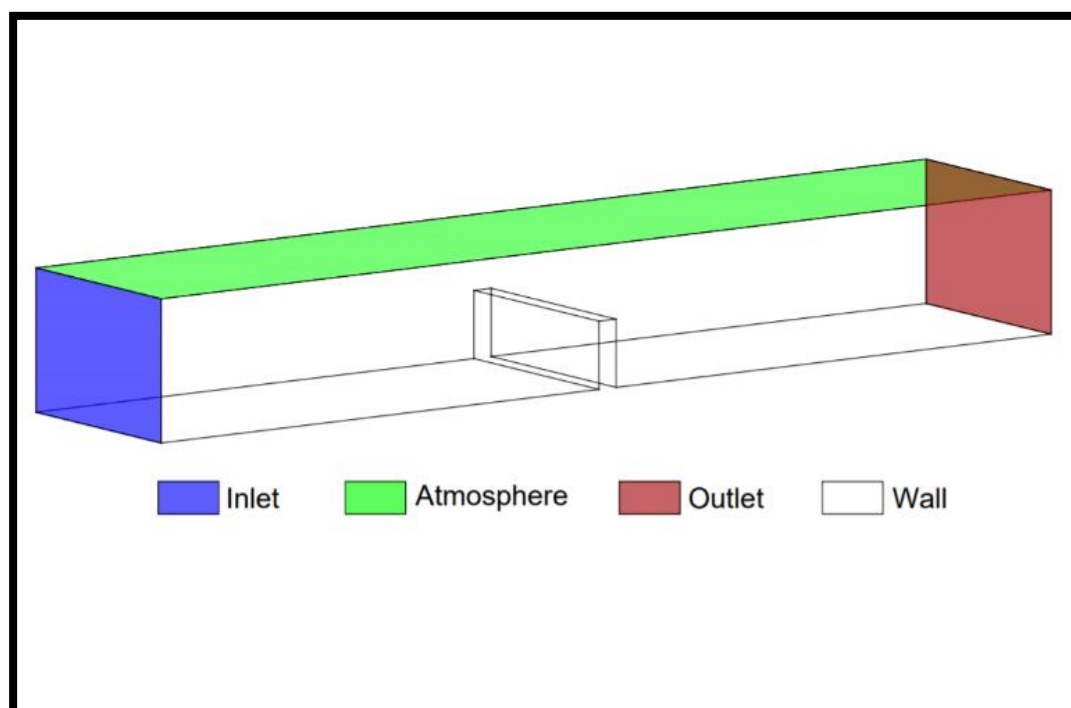
Tabla 8. Continuación

Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
T_i	0.04430	0.04570	0.04644	0.04880	0.05083	0.05812	0.06195
l (m)	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840	0.00840
C_u	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000	0.09000
k (m ² /s ²)	0.00017	0.00011	0.00009	0.00005	0.00003	3.91×10^{-6}	1.6×10^{-6}
ε (m ² /s ³)	0.00005	0.00002	0.00002	0.00001	0.00000	1.51×10^{-7}	3.96×10^{-8}
Δt (s)	0.20000	0.26000	0.29900	0.44000	0.61000	1.80000	3.00000

Fuente Elaboración propia.

Para cada caso de simulación a desarrollar, se establecieron unas restricciones o valores límite, con el fin de determinar el comportamiento del modelo desde el inicio de la simulación, hasta el intervalo de tiempo final de la misma. Estos valores iniciales, son conocidos también como condiciones de frontera del proyecto y fueron definidos para este caso como: inlet (entrada del agua), outlet (salida del agua), wall (muros de paredes laterales y fondo del canal) y atmosphere (parte superior del canal a flujo libre).

Figura 6. Representación esquemática de las condiciones de frontera establecidas



Fuente Elaboración propia.

Las características de condiciones de frontera propuestas para el canal horizontal a flujo libre, se muestran en la Figura 6., observando claramente las áreas de entrada y salida de agua en el canal (Inlet y Outlet respectivamente), el área que representa los muros o paredes del canal y su fondo (Wall) y el área en donde figura la superficie libre o la zona que hace contacto con la presión atmosférica, llamado Atmosphere.

7.4 PUESTA EN MARCHA DE LAS SIMULACIONES Y EXTRACCIÓN DE RESULTADOS

Una vez chequeada la malla y configurados los archivos contenidos en los directorios como se explicó en los numerales 7.2 y 7.3, se procedió a dar inicio a la ejecución de las simulaciones para cada uno de los casos propuestos. Se realizó de manera preliminar una simulación para cada tamaño de malla (0.01m, 0.03m y 0.05m) del vertedero de una contracción, con el fin de extraer los resultados de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero una vez se estabilizara el flujo en su último intervalo de tiempo, con el fin de compararla con los resultados de las alturas experimentales, definidos en el numeral 7.1; el anterior procedimiento junto a la verificación de otros parámetros que se explicarán en el capítulo de análisis de resultados, se realizó para cada uno de los tamaño de malla, eligiendo de esta manera el tamaño de celda de malla más eficiente y adecuado para garantizar la precisión del modelo.

Una vez elegido y definido el mejor tipo de malla, se ejecutó la simulación para los casos hipotéticos, correspondientes al vertedero rectangular con una contracción y al vertedero rectangular con dos contracciones, se realizó el post procesamiento de la información extrayendo los resultados de las simulaciones desde el software OpenFOAM y se llevaron a Excel con el objetivo de recrear las gráficas y tablas necesarias que permitieron obtener las comparaciones entre el caso principal y los casos hipotéticos y de esta manera se obtuvo un análisis sustentado de los resultados simulados con sus respectivas conclusiones.

Continuando con el proceso “checkMesh” en la terminal, una vez validado el estado de la malla como OK, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se debe Ingresar el comando: *setFields* esto con el fin de aplicar las condiciones de volumen inicial definidas en el numeral 7.3.
2. Seguido de esto, se debe escribir la palabra *paraFoam* para poder visualizar en la plataforma Paraview el canal con el volumen de agua configurado previamente.
3. Una vez ejecutados los anteriores comandos, ya está todo listo para poner a correr el modelo. Para esto, se debe teclear en la terminal el comando: *interFoam > log &*, donde “log” es el archivo en el cual se guarda todo el código generado por la

simulación; allí es posible consultar aspectos técnicos de la geometría, malla, propiedades del fluido, parámetros calculados por el modelo, número de Courant, tiempo de simulación, entre otros. El tiempo que toma este proceso depende de la capacidad de procesamiento de cada equipo.

4. Una vez terminado el proceso los resultados podrán ser visualizados y analizados en la herramienta Paraview. Para abrirla ejecute el siguiente comando: *paraFoam*

Con la apertura de la simulación en la plataforma Paraview, fue posible extraer los resultados necesarios para los análisis, conclusiones y recomendaciones acerca de los casos de modelación efectuados.

Los datos generados por las simulaciones en el canal horizontal, como el tiempo computacional, número de volúmenes por malla y número máximo de Courant alcanzado en el último intervalo de tiempo o en el momento de estabilización del flujo, se pudieron visualizar en el archivo “log” generado al momento de finalizar el proceso de ejecución en la terminal. Otros datos específicos del comportamiento del flujo a lo largo del canal con las condiciones configuradas, se obtuvieron desde la plataforma Parafoam, mediante el siguiente procedimiento:

1. Se debe Ubicar el modelo siempre en el último intervalo de tiempo.
2. En la barra de herramientas se seleccionan las siguientes opciones:
Filters → Data analysis → Plot over line.
3. Con la herramienta “Plot Over Line” creamos una línea que va desde la cresta del vertedero hasta el punto final de la altura del canal. Esto se hace con el fin de poder evaluar la altura de la lámina de agua y la velocidad justo en ese punto. Se genera una gráfica con todos los parámetros contenidos en el flujo del agua a través del canal horizontal.
 - a) Cuando se genere la gráfica, solamente deben dejarse activadas las casillas que quieran visualizarse en el esquema, para este caso “alphawater” (altura de la lámina de agua) o U (Velocidad).
 - b) Se ingresa nuevamente la pestaña Filters → Data analysis → Integrate variables, después se oprime “Apply”. Aparecerá una tabla de datos, y de nuevo en la pestaña Filters se selecciona la opción Plot selection over time; en propiedades se da click en “Copy Active Selection” y después se aplican las selecciones.
 - c) Finalmente, aparecerán las gráficas de la altura de la lámina de agua contra el tiempo o la velocidad contra el tiempo (según sea el caso). Se podrán obtener los datos de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero o velocidad en cualquier intervalo de tiempo, ubicando el cursor en el punto de la línea que se desee consultar. Aparecerán dos valores: el

primero corresponde al tiempo y el segundo a la altura de la lámina de agua o a la velocidad. También pueden exportarse los datos en formato .csv para análisis de resultados y creación de gráficas referentes a los casos de modelación simulados.

La información del proceso de simulación, se encuentra más detallada en el ANEXO A de este informe, correspondiente a la guía de laboratorio para la simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la ejecución de las simulaciones de cada uno de los grupos seleccionados y su posterior análisis. Además, se verificará la estabilidad del modelo y se evaluarán los resultados obtenidos con los criterios expuestos en los numerales 5.2.4 y 5.2.5, respectivamente.

8.1 SELECCIÓN DE LA MALLA

Como se mencionó en el apartado 7.2, se realizó el modelamiento de 3 mallas con diferente tamaño de celdas, esto con el propósito de determinar cuál se ajusta mejor al experimento que se pretende modelar. Para cada grupo de simulación se obtuvieron las alturas de la lámina de agua sobre el vertedero con ayuda de la herramienta Paraview (proceso descrito en el numeral 7.4) y se extrajeron dos datos de la terminal de Ubuntu: el número de Courant y el tiempo computacional.

Tabla 9. Resultados obtenidos para la malla 1 – 0.01m

Grupo	Q (m ³ /s)	H lámina de agua sobre el vertedero (m)			Valoración *	Co	Tiempo cómputo (s)	Q modelado (m ³ /s)**
		Exp.	Modelo	Diferencia				
I	0,00219	0,057	0,0722	0,0150	☹	0,925	7398	0,00316
II	0,00171	0,048	0,0595	0,0116	☹	0,961	7063	0,00232
III	0,00150	0,045	0,0548	0,0099	☹	0,910	6907	0,00204
IV	0,00101	0,035	0,0394	0,0044	☺	0,981	7228	0,00120
V	0,00073	0,029	0,0303	0,0013	☺	0,963	7589	0,00079
VI	0,00025	0,015	0,0163	0,0016	☺	0,990	6480	0,00030
VII	0,00015	0,011	0,0052	0,0054	☹	0,992	5775	0,00005

* Valoración de satisfacción en una escala visual, no representa un criterio de selección de malla.

** Caudal calculado empleando la altura de la lámina de agua obtenida del modelo ejecutado.

Fuente Elaboración propia.

Tabla 10. Resultados obtenidos para la malla 2 – 0.03m

Grupo	Q (m³/s)	H lámina de agua sobre el vertedero (m)			Valoración *	Co	Tiempo cómputo (s)	Q modelado (m³/s)**
		Exp.	Modelo	Diferencia				
I	0,00219	0,057	0,0690533	0,0118	☹	0,953	164,0	0,00294
II	0,00171	0,048	0,0559585	0,0080	☹	0,963	166,0	0,00210
III	0,00150	0,045	0,0515733	0,0066	☹	0,990	164,0	0,00185
IV	0,00101	0,035	0,0427670	0,0078	☹	0,982	155,0	0,00137
V	0,00073	0,029	0,0326850	0,0037	☺	1,000	116,0	0,00089
VI	0,00025	0,015	0,0096564	0,0050	☺	0,990	99,0	0,00013
VII	0,00015	0,011	0,0036313	0,0070	☺	0,994	82,0	0,00003

* Valoración de satisfacción en una escala visual, no representa un criterio de selección de malla.

** Caudal calculado empleando la altura de la lámina de agua obtenida del modelo ejecutado.

Fuente Elaboración propia.

Tabla 11. Resultados obtenidos para la malla 3 – 0.05m

Grupo	Q (m³/s)	H lámina de agua sobre el vertedero (m)			Valoración *	Co	Tiempo cómputo (s)	Q modelado (m³/s)**
		Exp.	Modelo	Diferencia				
I	0,00219	0,057	0,0578234	0,0005	☺	0,984	28,0	0,00222
II	0,00171	0,048	0,0524409	0,0044	☺	0,978	30,0	0,00190
III	0,00150	0,045	0,0487986	0,0038	☺	0,991	29,0	0,00169
IV	0,00101	0,035	0,0399576	0,0050	☺	0,984	29,0	0,00123
V	0,00073	0,029	0,0348820	0,0059	☺	0,997	33,0	0,00099
VI	0,00025	0,015	0,0186887	0,0040	☺	0,980	31,0	0,00037
VII	0,00015	0,011	0,0119673	0,0013	☺	0,995	22,0	0,00018

* Valoración de satisfacción en una escala visual, no representa un criterio de selección de malla.

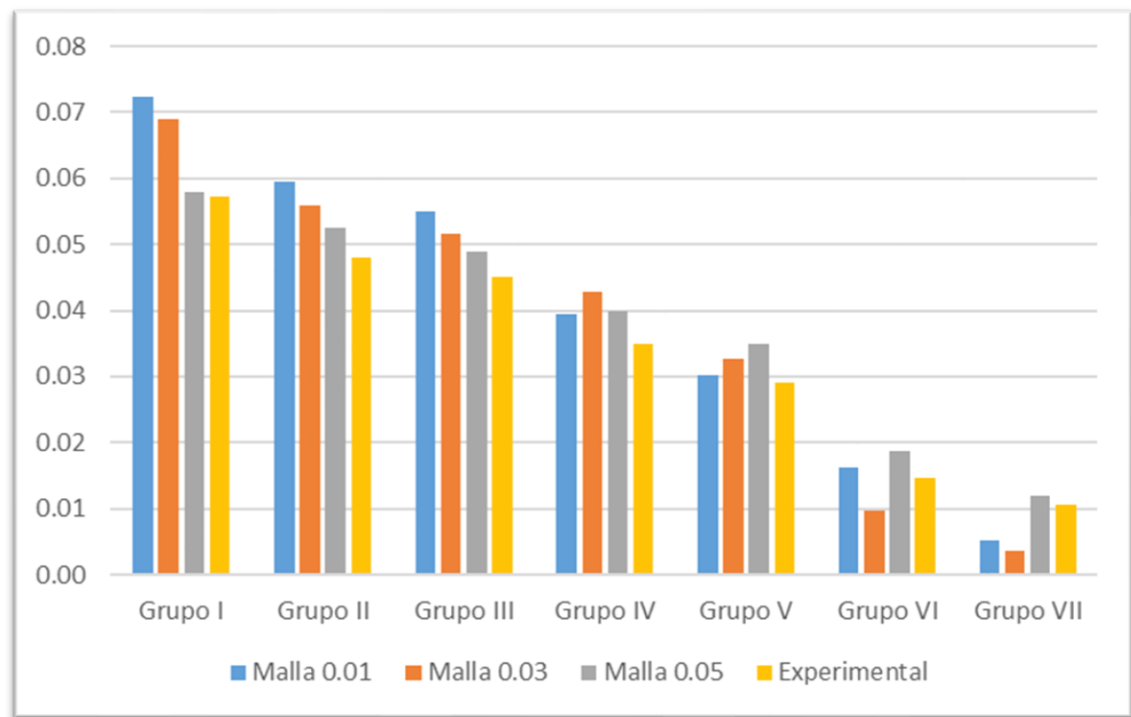
** Caudal calculado empleando la altura de la lámina de agua obtenida del modelo ejecutado.

Fuente Elaboración propia.

En las tablas 9, 10 y 11 se consignaron los resultados extraídos de la terminal de Ubuntu para cada una de las mallas, siendo estas correspondientes a los tamaños de 0.01m, 0.03m y 0.05m respectivamente para la geometría del canal horizontal y del vertedero rectangular sin contracciones. Las tablas contienen la información referente a los 7 grupos de modelación seleccionados en el numeral 7.1, con los caudales asignados y la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero para cada grupo de modelación; se plasman también las alturas experimentales y la diferencia entre lo modelado y lo experimental. Mediante una valoración de satisfacción en una escala visual, se buscó expresar si la diferencia entre las alturas fue inaceptable, medianamente aceptable o aceptable. Por último, se muestra también el número de Courant final arrojado (que en ningún caso superó la unidad), junto con el tiempo computacional empleado para desarrollar la simulación de cada grupo y finalmente el resultado del caudal modelado.

Observando los datos en la tabla, fue posible crear unos criterios de selección que hasta ese momento ya sugerían un tamaño de malla más óptimo para la simulación. Sin embargo, y con el único fin de tener claras las razones por las cuales se seleccionó determinada malla, se procedió a representar los datos consignados en las tablas anteriores, en las siguientes gráficas:

Figura 7. Comparación de las alturas de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero para los tres tamaños de malla y el valor experimental.



Fuente Elaboración propia.

En la figura 7, se pueden observar las barras de comparación de altura de la lámina de agua entre los diferentes tipos de malla y también para los valores experimentales entre cada uno de los 7 grupos de modelación; así las cosas, se infirió que las alturas para los tamaños de malla de 0.01m y 0.03m son las que están más alejadas de las alturas experimentales y que por el contrario las alturas de la malla de 0.05m es la que se más se asemeja a las alturas de la barra experimental.

Tabla 12. Alturas de la lámina de agua consolidadas para cada caso de modelación

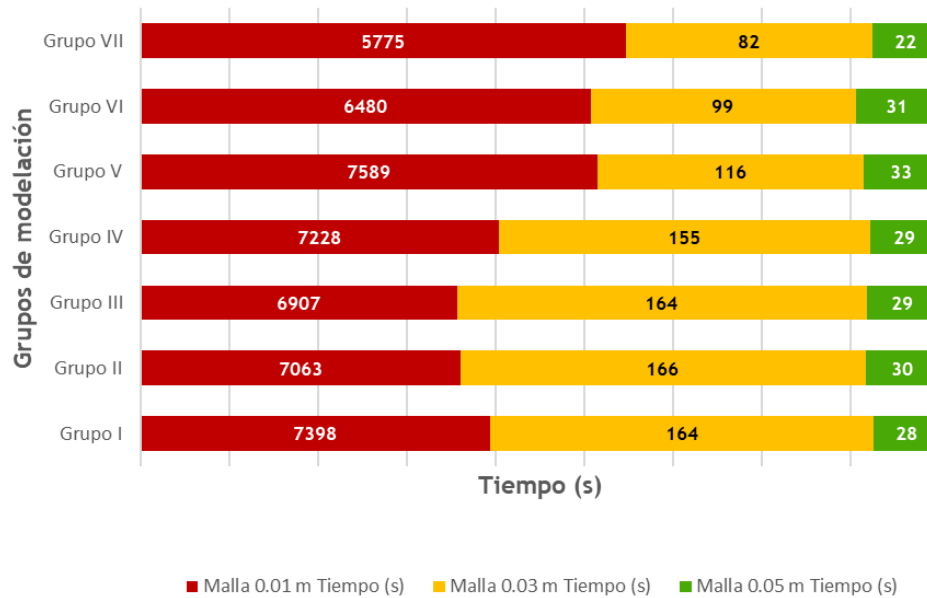
Grupo de modelación	Malla 0.01m	Malla 0.03m	Malla 0.05m	Experimental
Grupo I	0.0722591	0.06905	0.0578234	0.0573000
Grupo II	0.0595838	0.05596	0.0524409	0.0480000
Grupo III	0.0548870	0.05157	0.0487986	0.0450000
Grupo IV	0.0393720	0.04277	0.0399576	0.0350000
Grupo V	0.0303037	0.03269	0.0348820	0.0290000
Grupo VI	0.0162815	0.00966	0.0186887	0.0146704
Grupo VII	0.0052155	0.00363	0.0119673	0.0106415

* Todas las alturas están expresadas en metros (m).

Fuente Elaboración propia.

Para el caso de la comparación con base en el tamaño de la malla y el tiempo computacional, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 8. Comparativo entre el tamaño de malla y el tiempo computacional empleado.

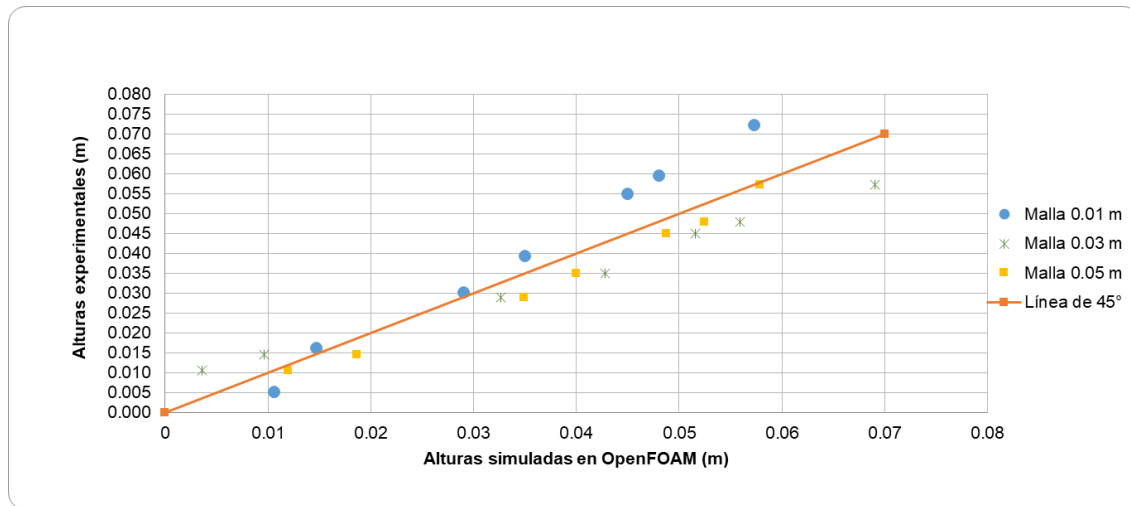


Fuente Elaboración propia.

En la figura anterior, se plasman los datos del tiempo computacional empleado en la simulación de cada grupo en segundos (s).

Se evidencia la gran diferencia que existe entre los tres tamaños de malla, siendo esta, mucho mayor en la malla más fina correspondiente al tamaño de 0.01m. La gráfica nos indica que el tamaño de malla más favorable en cuanto al tiempo computacional requerido para correr cada grupo de modelación, es la malla N°3 correspondiente al tamaño de 0.05m, porque la barra que representa, es la que más se asemeja a la barra de los datos experimentales en la mayoría de los 7 grupos de modelación.

Figura 9. Representación de la dispersión de los datos simulados comparados con los experimentales.



Fuente Elaboración propia

Las diferencias entre las alturas experimentales o medidas de forma presencial en el laboratorio y las alturas simuladas en OpenFoam, las muestra la figura 9. Se evidencia claramente que la mayoría de los datos simulados, están por debajo de los datos medidos, pero también que hay una cantidad significativa de datos modelados que están por encima de los datos experimentales y tan sólo un dato sobre la línea de alturas medidas en laboratorio.

Con esta gráfica, es posible analizar la forma en la que los datos de cada malla se acercan o se alejan de los datos experimentales, sugiriendo, al igual que las dos gráficas anteriores, que el tamaño de malla más conveniente a elegir, es la malla número 3, correspondiente al tamaño de 0.05m.

Con base en los resultados anteriormente presentados, finalmente se decidió trabajar con la malla número 3 cuyo tamaño de celda fue de 0.05m, teniendo en cuenta que las gráficas de las figuras 7, 8 y 9, apuntaron de forma contundente

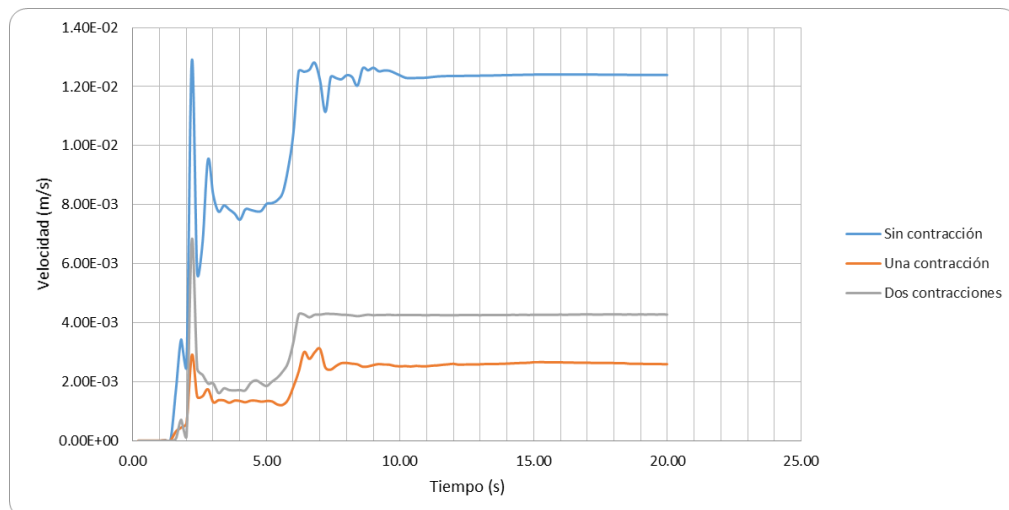
hacia unos resultados más cercanos a los esperados o medidos experimentalmente.

8.2 COMPARACIÓN DE ALTURAS MEDIDAS Y VELOCIDADES PARA EL CASO BASE Y LOS CASOS HIPOTÉTICOS

Después de decidir la malla con el tamaño más óptimo para el desarrollo de los objetivos del proyecto, se hizo una elección estratégica de los grupos de modelación de la simulación principal (vertedero sin contracciones) para ser comparados con los dos casos hipotéticos planteados (vertedero con una contracción y vertedero con dos contracciones), de manera que, los grupos de simulación seleccionados para llevar a cabo las comparaciones subsiguientes, fueron el grupo I, grupo III y grupo V.

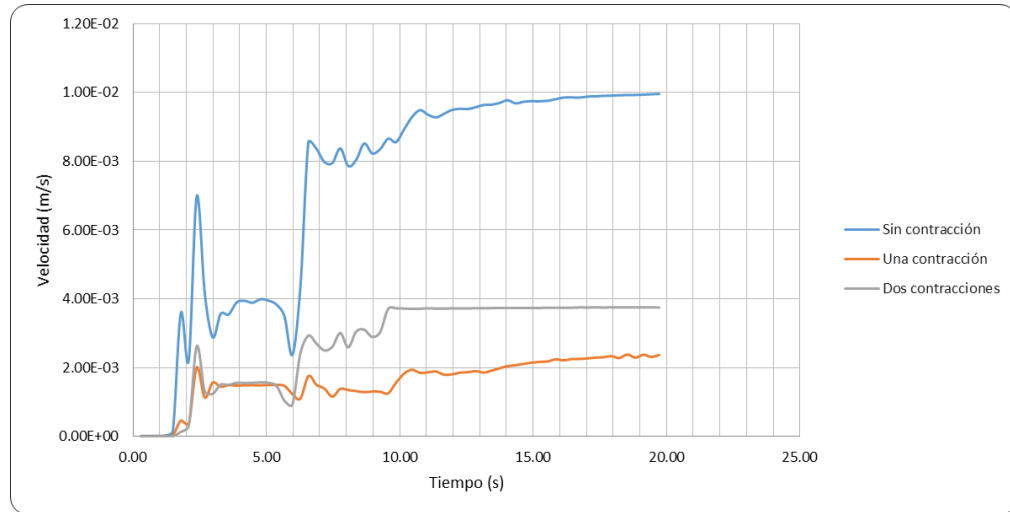
Posteriormente y con los datos obtenidos según lo explicado en el numeral 7.4, referentes a altura de la lámina de agua sobre el vertedero y la velocidad, se procedió a consolidar toda la información en las tablas presentadas en el de este informe, las cuales contienen los parámetros mencionados para cada intervalo de tiempo generado en la simulación, que para este caso fue cada 0.2s, obteniendo las siguientes gráficas:

Figura 10. Comparación de la velocidad en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo I de modelación



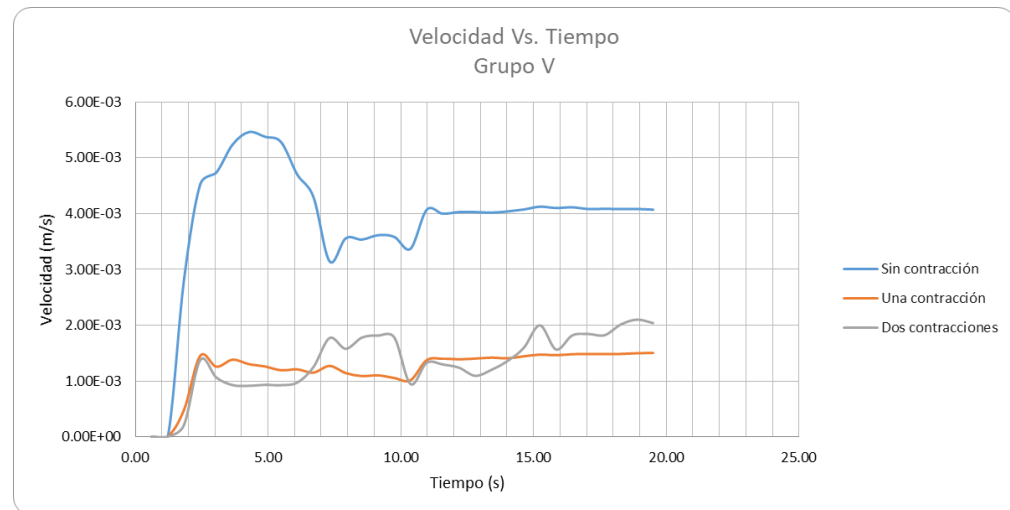
Fuente Elaboración propia

Figura 11. Comparación de la velocidad en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo III de modelación.



Fuente Elaboración propia

Figura 12. Comparación de la velocidad en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo V de modelación.



Fuente Elaboración propia

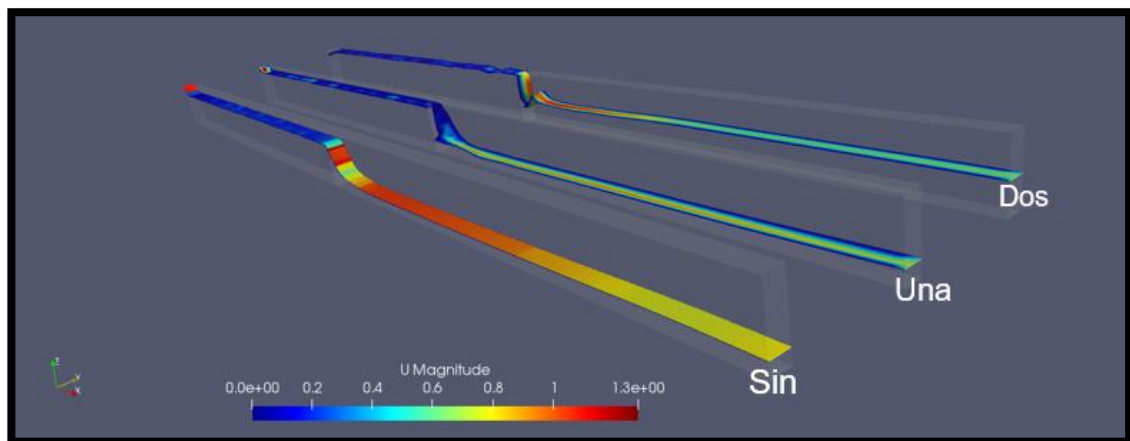
Si se hace una comparación inicialmente individual de las figuras 10, 11 y 12, se puede evidenciar que los grupos I y II presentan un comportamiento similar en cuanto al orden en el que se desarrolla la velocidad para los vertederos sin contracción, con una y dos contracciones; de esta forma, se deduce que la velocidad alcanzada por el flujo de agua es mayor cuando el canal tiene un vertedero sin contracción y la velocidad es menor cuando el canal tiene un vertedero con una

sola contracción, ubicando el vertedero de dos contracciones en la mitad de estas dos líneas de Velocidad vs. Tiempo. Caso contrario sucede en la figura 12 correspondiente al grupo V de modelación, en donde, si bien la velocidad más alta es desarrollada también cuando el agua pasa por el vertedero sin contracción, en los casos hipotéticos de una y dos contracciones la velocidad del flujo del agua a través del tiempo de simulación, se comporta de manera similar.

De esta forma, si se analizan las gráficas de forma paralela, es posible identificar que el grupo I correspondiente a la figura 10, alcanza una gran velocidad pasando de forma abrupta por encima del vertedero, desarrollando una velocidad igualmente considerable aguas abajo e incorporándose nuevamente a las líneas de flujo del canal hasta estabilizarse por completo en el último intervalo de tiempo. En el grupo III de modelación pasa algo similar al grupo I, pero en menor escala, pues se observa que la velocidad disminuye. Para el caso del grupo V de modelación, es evidente ver como la curva ya no presenta picos tan agudos, sino que deja ver una velocidad mucho más controlada, que no llega de forma contundente aguas abajo y por lo tanto alcanza la estabilidad del flujo de una manera pausada y sin fluctuaciones tan marcadas como los dos grupos de modelación analizados.

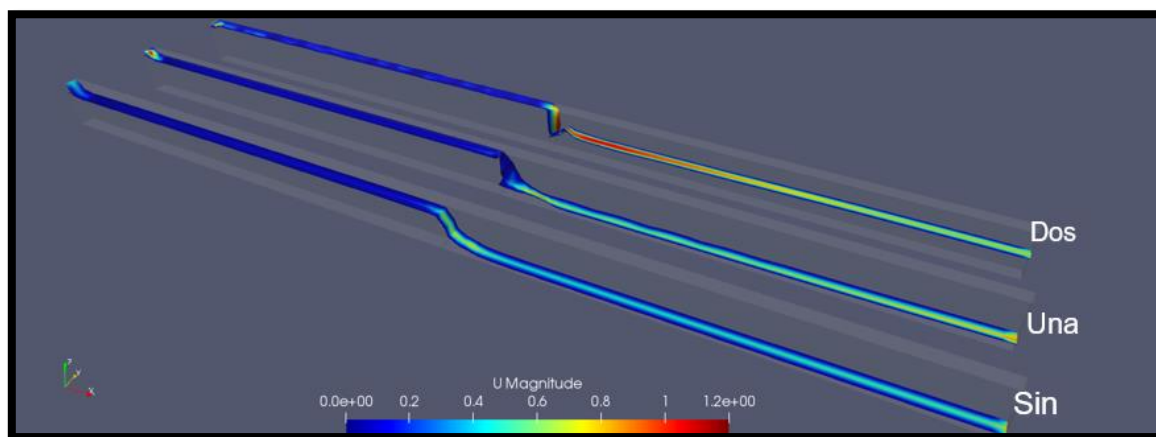
Los anteriores análisis fueron sustentados de forma cualitativa con base en los siguientes esquemas extraídos del software OpenFOAM y representados en las figuras 13, 14 y 15:

Figura 13. Comportamiento de la velocidad del flujo en el canal y sobre los diferentes tipos de vertederos para el grupo I de modelación.



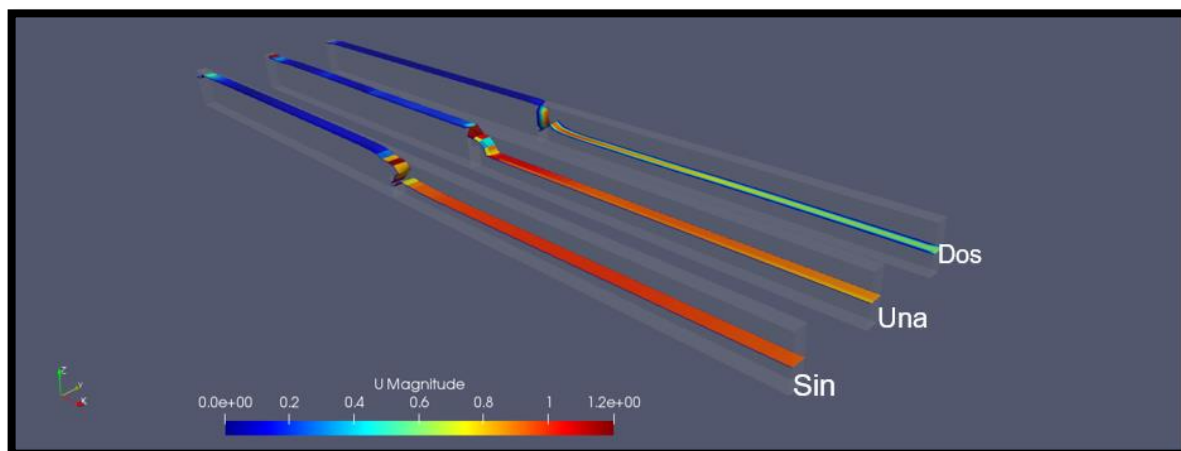
*-Sin: Sin contracción. -Una: Una contracción. -Dos: Dos contracciones
Fuente Software OpenFOAM-Modelación propia

Figura 14. Comportamiento de la velocidad del flujo en el canal y sobre los diferentes tipos de vertederos para el grupo III de modelación.



*-Sin: Sin contracción. -Una: Una contracción. -Dos: Dos contracciones
Fuente Software OpenFOAM-Modelación propia

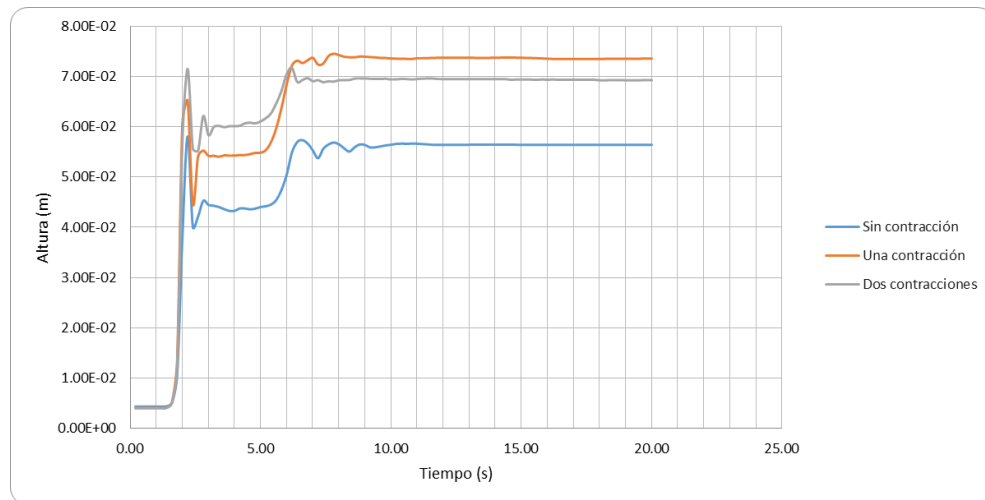
Figura 15. Comportamiento de la velocidad del flujo en el canal y sobre los diferentes tipos de vertederos para el grupo V de modelación.



*-Sin: Sin contracción. -Una: Una contracción. -Dos: Dos contracciones
Fuente Software OpenFOAM-Modelación propia

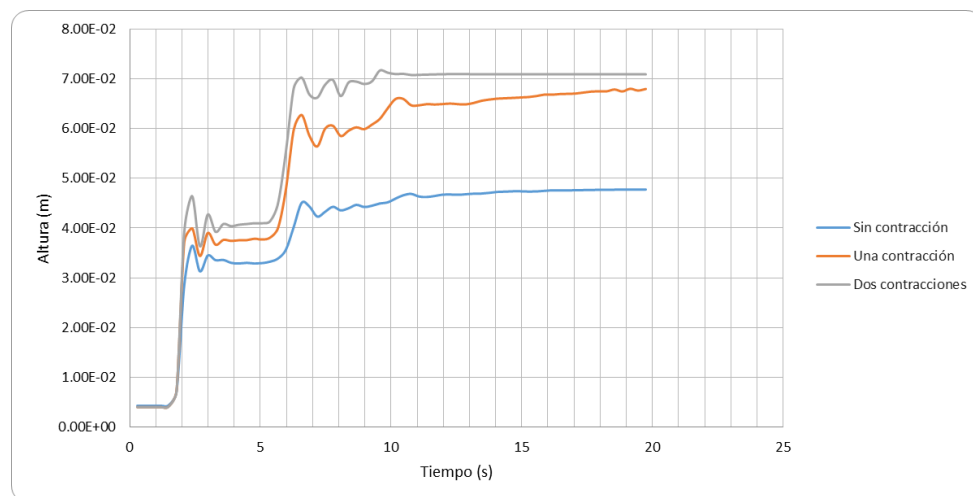
Para el análisis de las alturas de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero, se obtuvieron las siguientes gráficas:

Figura 16. Comparación de la altura de la lámina de agua en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo I de modelación.



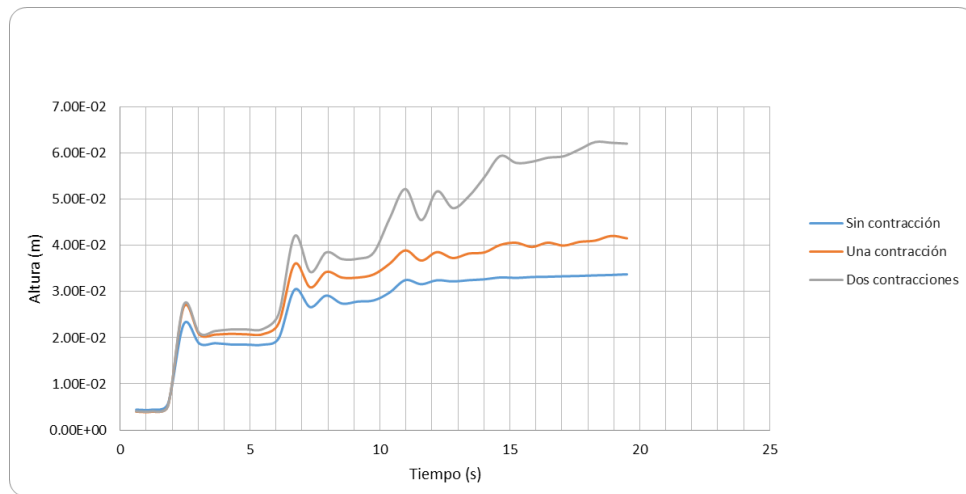
Fuente Elaboración propia

Figura 17. Comparación de la altura de la lámina de agua en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo III de modelación.



Fuente Elaboración propia

Figura 18. Comparación de la altura de la lámina de agua en función del tiempo entre el caso base y los casos hipotéticos para el grupo V de modelación.



Fuente *Elaboración propia*

Al analizar las figuras 16, 17 y 18, respecto a la relación de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero con el tiempo, de forma general se puede inferir que el comportamiento del flujo sobre la cresta es muy similar en los diferentes tipos de vertedero (sin contracción, con una contracción y con dos contracciones) aunque a diferentes alturas, pues las líneas que los representan muestran una tendencia de cierto paralelismo entre ellas.

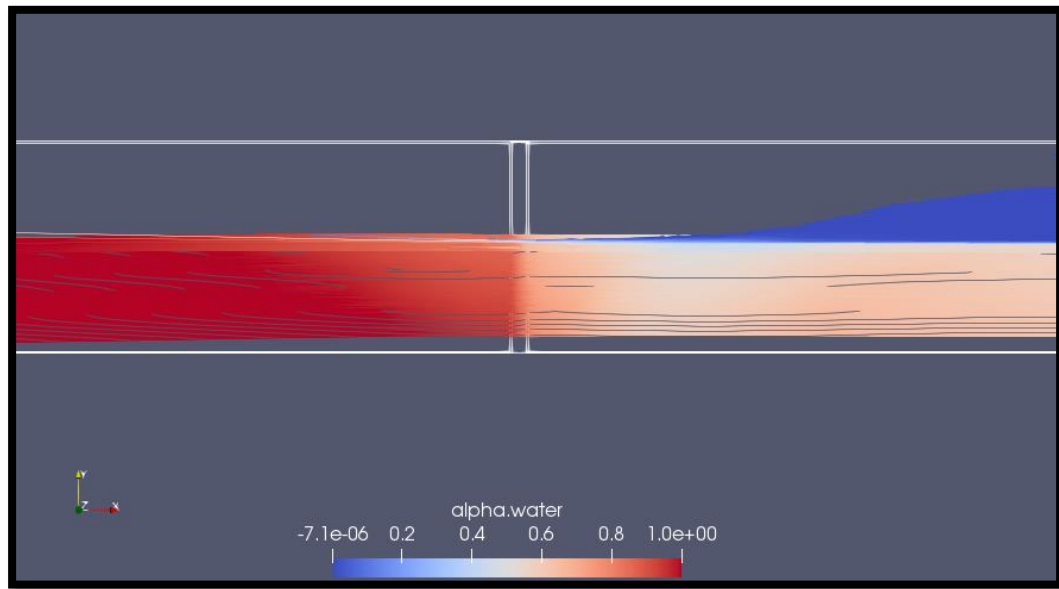
Para los grupos de modelación III y V, la mayor altura de lámina de agua sobre la cresta del vertedero, es desarrollada por el vertedero de dos contracciones. Sin embargo, para el grupo I la mayor altura la alcanza el vertedero que presenta una sola contracción. Es preciso inferir también que, aunque en el caso base y los casos hipotéticos de todos los grupos de modelación, la altura de la lámina de agua consigue su estabilidad a los 20 segundos como bien lo muestran las gráficas, estas nos indican que a medida que el caudal disminuye, el flujo tarda más en alcanzar un punto estable, respecto a los caudales de mayor magnitud, comportamiento que se puede visualizar con más énfasis, en los vertederos con una y dos contracciones.

Por último, es válido afirmar que, la altura de la lámina de agua en los diferentes tipos de vertederos de cada grupo de modelación se comporta de manera muy similar hasta aproximadamente el segundo dos de simulación, después de este intervalo de tiempo, la altura comienza a presentar variaciones significativas en todas las modelaciones llevadas a cabo.

Teóricamente se realizó la verificación de los anteriores resultados de forma que, con el área mojada, con las alturas y anchos de las secciones transversales

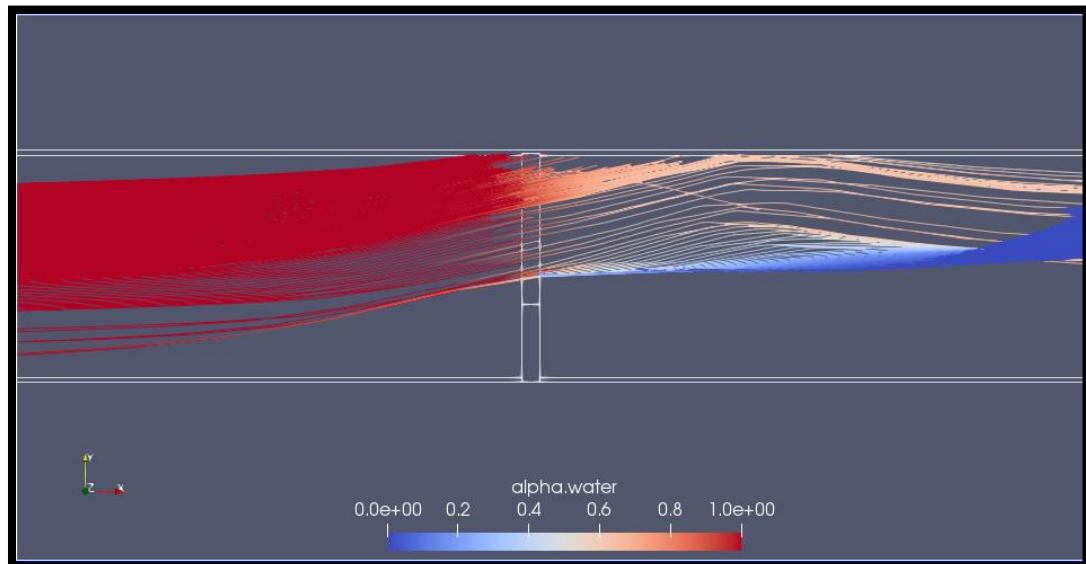
correspondientes a cada vertedero y con los caudales trabajados en los grupos de modelación I, III y V, las velocidades se comportaron de acuerdo a lo esperado por principio de continuidad dando firmeza a la precisión de la simulación y permitiendo evidenciar el acercamiento de lo modelado con lo experimentado.

Figura 19. Paso del flujo de agua para el parámetro de altura sobre la cresta del vertedero sin contracción.



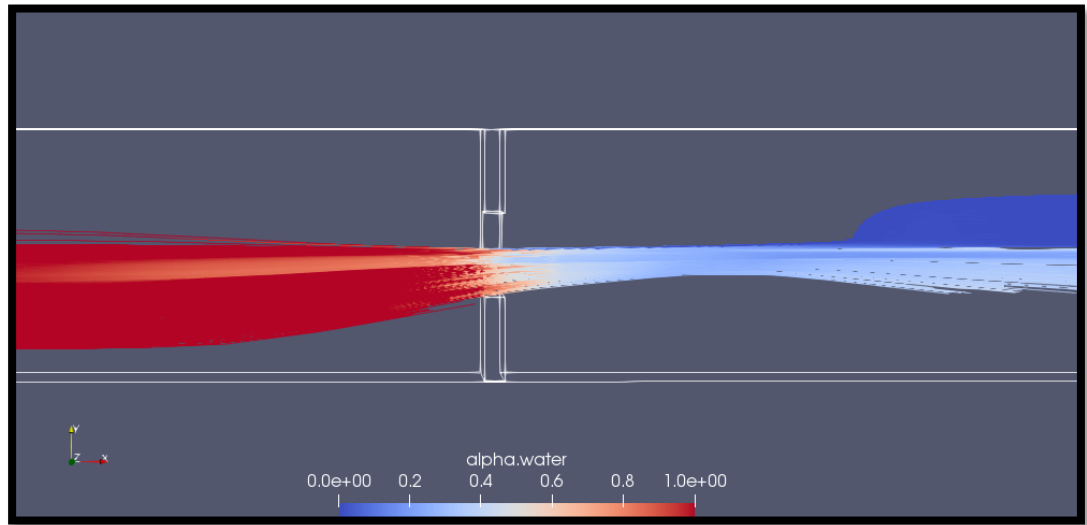
Fuente Software OpenFOAM-Modelación propia

Figura 20. Paso del flujo de agua para el parámetro de altura sobre la cresta del vertedero con una contracción.



Fuente Software OpenFOAM-Modelación propia

Figura 21. Paso del flujo de agua para el parámetro de altura sobre la cresta del vertedero con dos contracciones.



Fuente Software OpenFOAM-Modelación propia

En las figuras 19, 20 y 21 se muestra en planta, el paso de la lámina de agua bajo el parámetro de altura sobre la cresta del vertedero, a través de los diferentes tipos de vertederos propuestos (Caso base: Sin contracción y casos hipotéticos: Una contracción y dos contracciones). En las figuras se representan lo que serían las líneas de flujo del recorrido del agua antes, sobre y después del vertedero, indicando así la dirección del mismo.

8.3 VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD

Para verificación de estabilidad numérica se utilizó la condición CFL, que determina que una solución es numéricamente estable si se cumple que el número de Courant (Co) es inferior a la unidad.

Este análisis de estabilidad se llevó a cabo para las simulaciones ejecutadas de los tres tipos de vertederos.

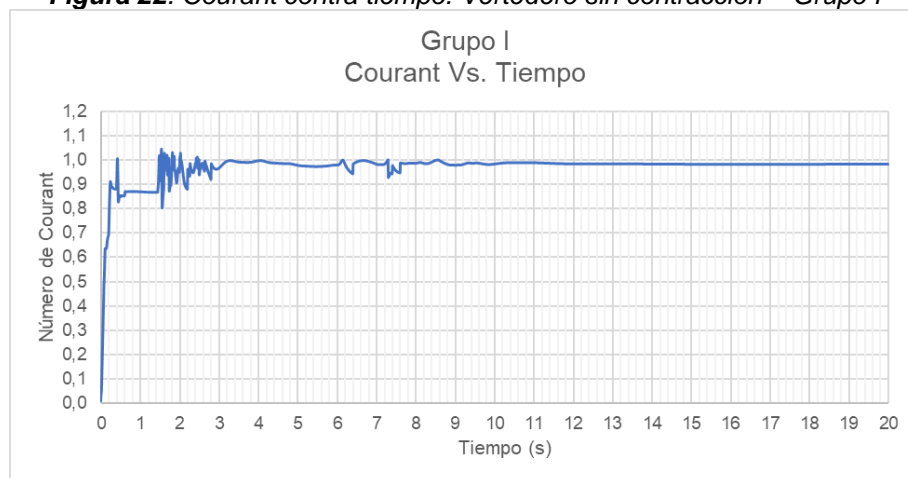
Las figuras 22 a 28 muestran el comportamiento del Courant a través del tiempo, correspondientes al vertedero sin contracción. Se observa estabilización alrededor de los 10 – 15 segundos para los grupos I, II, III y V; el grupo IV toma un poco más de tiempo, pero logra la estabilización poco antes de finalizar la simulación. El grupo

VII parece ser constante a partir de la marca de los 11s, sin embargo, se desestabiliza ligeramente justo antes de finalizar la prueba.

Para todos los casos, al inicio de la simulación, se puede apreciar que el Co supera levemente el límite establecido, la causa de este comportamiento se puede atribuir al intervalo de tiempo que se fijó en las condiciones iniciales.

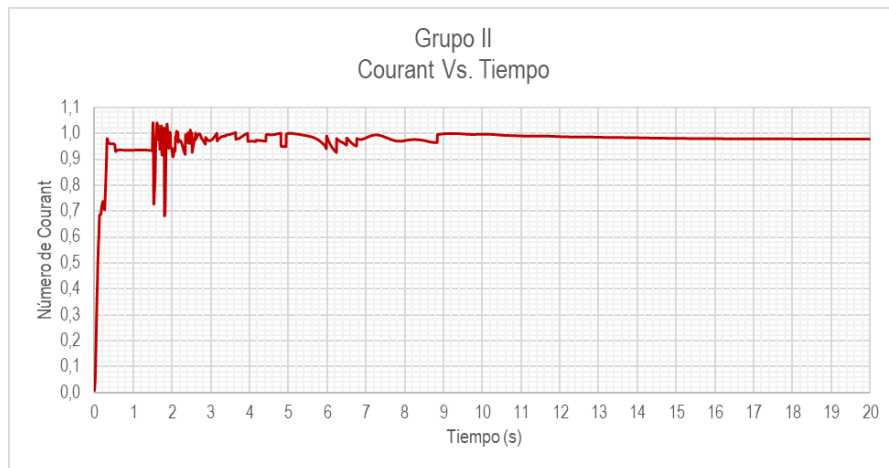
El caso del grupo VI es un caso particular, pues el Courant no es constante para ningún intervalo de tiempo, aun cuando el tiempo establecido para esta simulación es mayor respecto a los demás. Se puede decir que, para este caso, el Courant diverge.

Figura 22. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo I



Fuente Elaboración propia

Figura 23. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo II



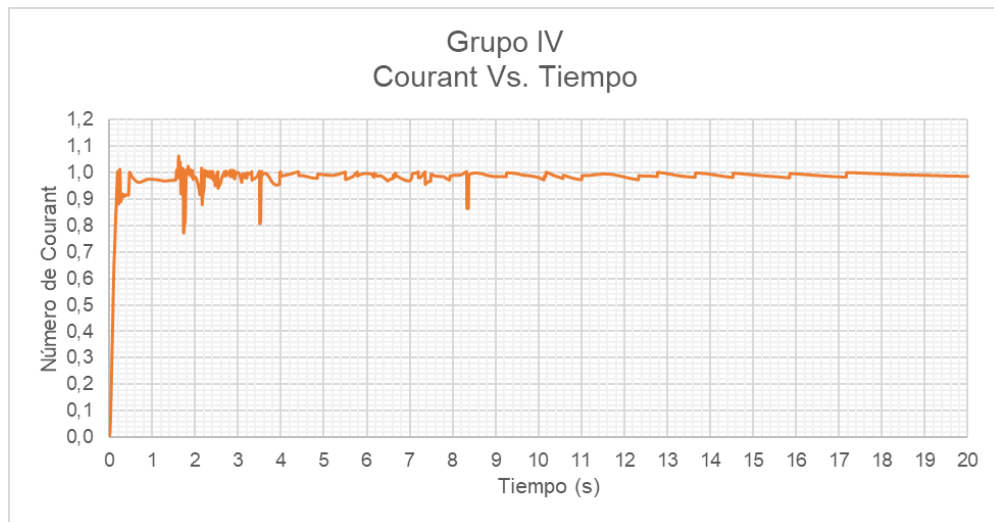
Fuente Elaboración propia

Figura 24. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo III



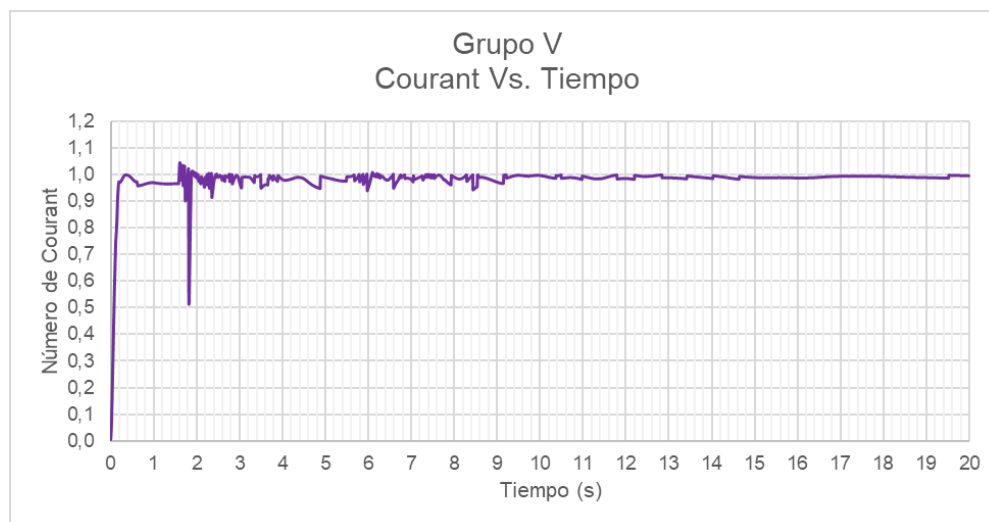
Fuente Elaboración propia

Figura 25. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo IV



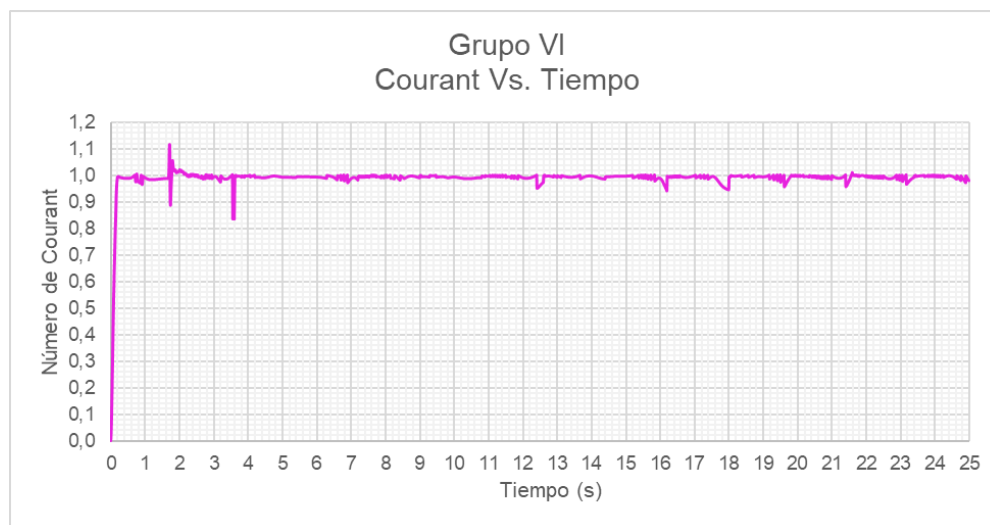
Fuente Elaboración propia

Figura 26. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo V



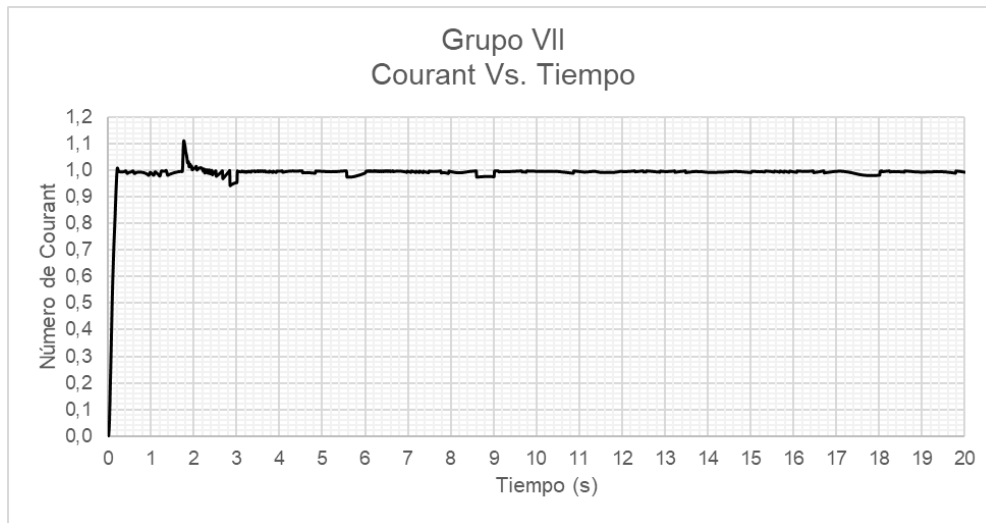
Fuente Elaboración propia

Figura 27. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo VI



Fuente Elaboración propia

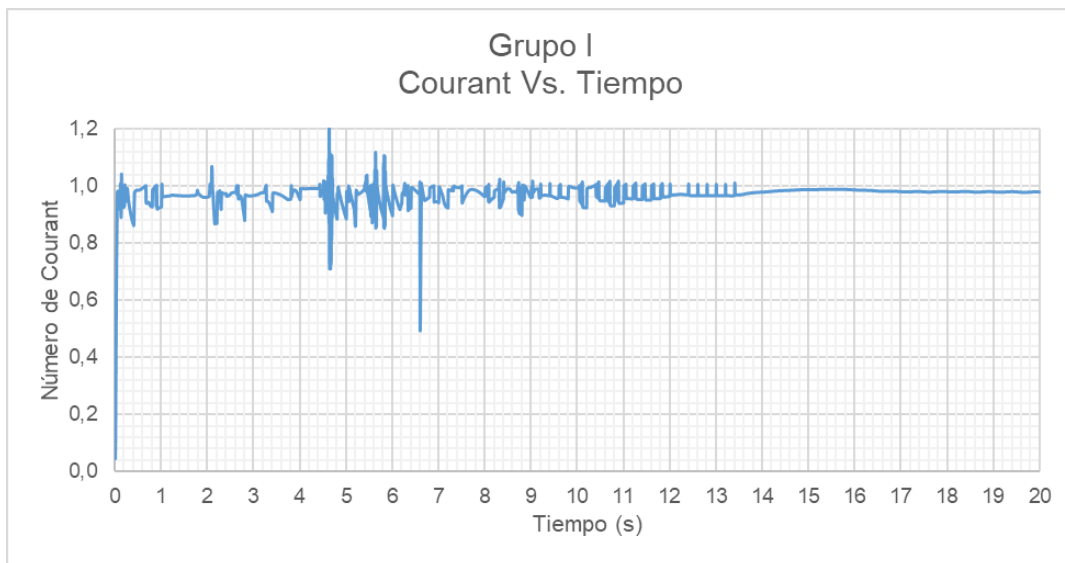
Figura 28. Courant contra tiempo. Vertedero sin contracción – Grupo VII



Fuente Elaboración propia

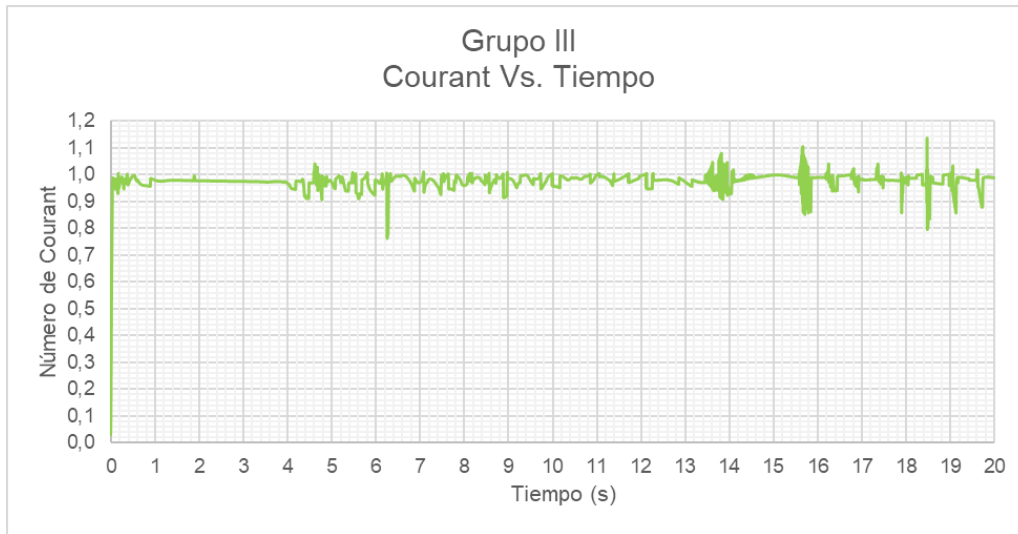
El comportamiento del Courant para los vertederos con una y dos contracciones se muestra en las Figuras 29 a 34.

Figura 29. Courant contra tiempo. Vertedero con una contracción – Grupo I



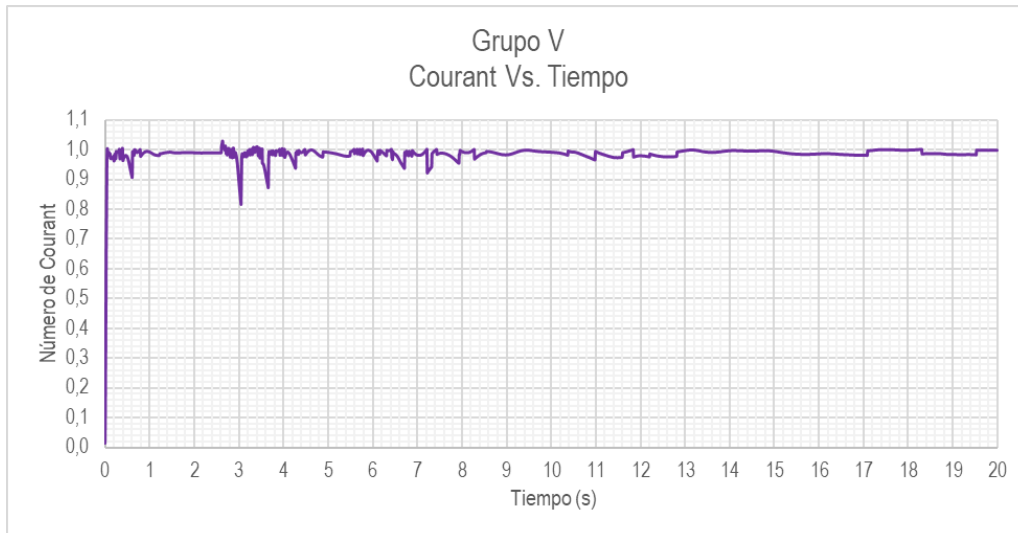
Fuente Elaboración propia

Figura 30. Courant contra tiempo. Vertedero con una contracción – Grupo III



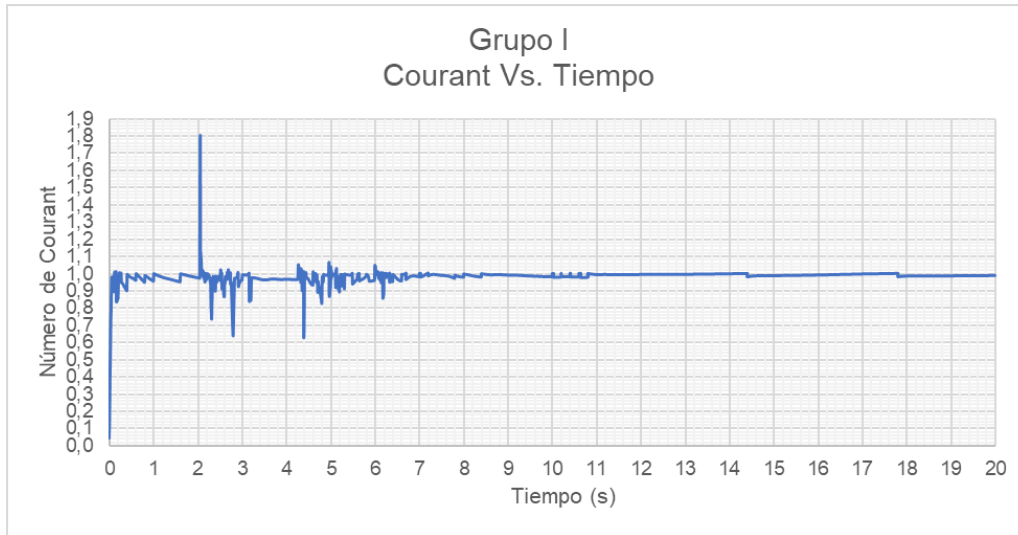
Fuente Elaboración propia

Figura 31. Courant contra tiempo. Vertedero con una contracción – Grupo V



Fuente Elaboración propia

Figura 32. Courant contra tiempo. Vertedero con dos contracciones – Grupo I



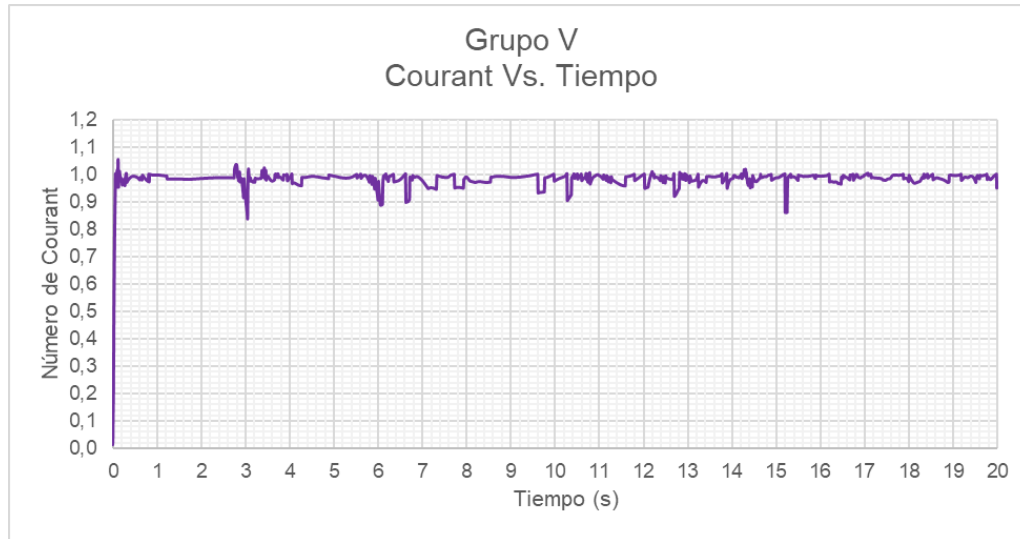
Fuente Elaboración propia

Figura 33. Courant contra tiempo. Vertedero con dos contracciones – Grupo III



Fuente Elaboración propia

Figura 34. Courant contra tiempo. Vertedero con dos contracciones – Grupo V



Fuente Elaboración propia

Para la totalidad de los casos se destaca un comportamiento fluctuante y solo se logra la estabilidad para el grupo I en ambos tipos de vertedero que, aunque llega a superar la unidad durante algunos intervalos (por poco doblando el límite establecido en el caso de la doble contracción), logra un comportamiento regular al final de la simulación.

Los casos restantes no muestran una tendencia clara a la estabilización. Esto podría corregirse disminuyendo el paso del tiempo, sin embargo, cabe anotar que estos casos se simularon con las mismas condiciones determinadas para el vertedero sin contracción, dado que el propósito de estas simulaciones era observar el impacto que tendrían las contracciones.

8.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

La caracterización del rendimiento del modelo es una parte fundamental del desarrollo y la prueba del mismo, para poder determinar qué tan buenos son los resultados obtenidos, fue preciso emplear cinco criterios estadísticos, descritos en el numeral 5.2.5, que permitieron la comparación de los resultados del modelo físico con los resultados del modelo computacional.

Las Tablas Tabla 13 y Tabla 14 muestran la calificación obtenida para cada uno de los criterios.

Tabla 13. Evaluación de resultados – Altura de la lámina de agua.

Métrica	Resultado					
	Malla 1		Malla 2		Malla 3	
NSE	0,71821152	<i>Muy bueno</i>	0,782313464	<i>Muy bueno</i>	0,93821654	<i>Excelente</i>
R ²	99,305112	<i>Excelente</i>	99,26910849	<i>Excelente</i>	98,7477444	<i>Muy bueno</i>
RMSE	0,00852361	<i>Muy bueno</i>	0,007491657	<i>Muy bueno</i>	0,00399115	<i>Excelente</i>
MAPE	21,5955596	<i>Regular</i>	26,66448243	<i>Regular</i>	13,2718961	<i>Muy bueno</i>
MAE	0,00720391	<i>Excelente</i>	0,007108756	<i>Excelente</i>	0,0035638	<i>Excelente</i>

Fuente Elaboración propia

Se observan resultados satisfactorios para cada una de las mallas, siendo excepcionalmente buenos aquellos correspondientes a la malla 3.

Todas las mallas muestran un ajuste lineal casi perfecto, es decir, se ajusta a las observaciones. Adicionalmente, se destacan valores muy cercanos a 0 para el error absoluto medio (MAE) y la raíz del error cuadrático (RSME), esto indica que las diferencias entre los valores experimentales y los observados son minúsculas.

Tabla 14. Evaluación de resultados – Caudal.

Métrica	Resultado					
	Malla 1		Malla 2		Malla 3	
NSE	0,5267535	<i>Bueno</i>	0,7087006	<i>Muy bueno</i>	0,9420366	<i>Excelente</i>
R ²	99,42855	<i>Excelente</i>	99,36643	<i>Excelente</i>	98,5488	<i>Muy bueno</i>
RMSE	0,0003598254	<i>Excelente</i>	0,00032191	<i>Excelente</i>	0,000147	<i>Excelente</i>
MAPE	32,72574	<i>Regular</i>	38,36779	<i>Regular</i>	21,37734	<i>Regular</i>
MAE	0,000486057	<i>Excelente</i>	0,000381341	<i>Excelente</i>	0,00017011	<i>Excelente</i>

Fuente Elaboración propia

Respecto a la evaluación para los caudales, los resultados se consideran favorables, no obstante, se advierte un desempeño inferior en el MAPE, que se ve afectado cuando los valores son cercanos a 0.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

OpenFOAM demostró no solo ser una herramienta adecuada para la representación del vertedero y sus condiciones de flujo, puesto que los resultados mostraron una alta concordancia con los datos experimentales, sino que también mostró ser una herramienta favorable y conveniente ya que, además de proporcionar el código base necesario, permite la adecuación del mismo conforme las necesidades específicas, esto gracias a su naturaleza de código abierto y uso libre. Adicionalmente, al emplear C++ como lenguaje de programación, facilita a los principiantes su entendimiento y manipulación.

El software no cuenta con una interfaz gráfica y esto puede dificultar la generación de la malla y convertir este en un proceso difícil de manejar; Salome-Meca simplificó la configuración de la geometría al permitir su modelamiento por medio de herramientas CAD, con una interfaz familiar que proporciona un manejo muy sencillo de modelos compuestos y una sencilla definición de las condiciones de frontera. Además de estas utilidades, y gracias a su interoperabilidad, no presentó ningún problema al exportar la malla a formato Foam, por lo cual se le considera una herramienta idónea para la elaboración del mallado.

Contrario a lo que se esperaba, la malla más gruesa mostró mejores resultados. El refinamiento de esta no reflejó mejoras notables en los mismos e implicó un consumo computacional significativamente mayor en relación con las mallas más gruesas. Aun así, todas las mallas mostraron un desempeño satisfactorio al ser evaluadas con los criterios planteados.

Los vertederos hipotéticos simulados, parecen mostrar un mejor comportamiento como disipadores de energía, pues la velocidad disminuye de manera considerable respecto al vertedero sin contracción; esto también podría indicar que son más convenientes para el control de caudales mayores, siendo el vertedero de una contracción el más eficiente.

Al reducir el área de la sección por la cual pasará el fluido, este experimenta un proceso de estrangulamiento del flujo del agua, lo que impacta directamente en la elevación de la misma representando así, una mayor altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero.

El número de Courant para cada uno de los casos de simulación planteados, indicó que fueron modelos numéricamente estables, pues la información extraída del software OpenFOAM arrojó resultados por debajo de la unidad (1). Lo anterior nos permite concluir la efectividad de la representación de lo modelado respecto a lo experimental.

Aun cuando las tres mallas presentan resultados generalmente buenos, se determina que la malla más adecuada para la simulación es la malla 3, que presenta mejores resultados en la evaluación de caudal, variable primordial por cuanto un vertedero es, ante todo, un aforador de caudal. Todas las mallas cumplen fácilmente con la mayoría de los criterios estadísticos con las que fueron evaluadas (NSE, R^2 , RMSE y MAE); en cuanto al MAPE, se encontraron valores relativamente altos (desfavorables para esta métrica), esto debido a que cuando el valor real no es cero, pero es bastante pequeño, el MAPE frecuentemente toma valores extremos. Con los resultados obtenidos, se considera que el modelo es capaz de representar la carga sobre el vertedero de manera satisfactoria para todas las condiciones de flujo modeladas.

Con el fin de dar continuidad a este proyecto, se recomienda realizar el proceso necesario para simular el montaje completo del laboratorio de aforadores de caudal en el canal horizontal del laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, incluyendo el vertedero de doble contracción ubicado en el tanque final.

Para simulaciones posteriores, se recomienda tomar y registrar de la manera más precisa posible, las medidas de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero, con el fin de garantizar la precisión del modelo; en efecto, se recomienda también no trabajar con grupos de datos promediados, para así evitar la propagación de los errores. Para los cálculos de los parámetros utilizados en la configuración del modelo en los diferentes directorios, se recomienda utilizar un número de Courant entre 0.5 y 0.7 y evaluar al menos tres mallas de tamaños diferentes, con el objetivo de tener una base fundamentada para realizar la simulación y sustentarla en el análisis de datos correspondiente.

Igualmente, es recomendable materializar o adquirir dos vertederos rectangulares, (uno de una contracción y uno más de dos contracciones) con la geometría diseñada para el modelamiento en OpenFOAM y de esta forma recrear mediante una práctica de laboratorio, las simulaciones de los casos hipotéticos ejecutadas en este proyecto, buscando obtener los datos experimentales para tales escenarios y finalmente compararlos con los datos resultantes suministrados en este documento.

ANEXOS

ANEXO A. Guía de laboratorio

ANEXO B. Simulaciones OpenFOAM

ANEXO C. Sitio web

BIBLIOGRAFÍA

Afif Khouri, Elías. 2004. *Apuntes de hidráulica para explotaciones forestales.* Oviedo, España. : Universidad de Oviedo, 2004. pág. 164. ISBN 8483174537.

Aguirre Núñez, Mario y Venegas Espinoza, Zócimo. 2005. *Consideraciones Hidráulicas para el diseño de estructuras de medición de caudal en canales abiertos.* Lima, Perú. : Ministerio de agricultura, Instituto Nacional de recursos naturales, Intendencia de recursos hídricos., 2005. pág. 85.

Aponte Pérez, Sebastián Alonso. 2017. *Modelación de Flujo en 3-D en Procesos de Mezcla Rápida en Plantas de Tratamiento Utilizando OpenFOAM.* Bogotá D.C. : Repositorio Institucional Escuela de Ingenieros. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/>, 2017.

Aztroza Salazar, Nicolás Andre. 2017. *Método de volúmenes finitos aplicado a las ecuaciones de Navier Stokes y en el funcionamiento de vertederos. Tesis de grado.* Valparaíso, Chile. : Universidad Técnica Federico Santa Maria, departamento de obras civiles., 2017.

Bansal, R. K. 2005. *A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines.* s.l. : Firewall Media, 2005. pág. 1093. ISBN 8170083117.

Blazek, Jiri. 2001. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications.* s.l. : Elsevier, 2001. ISBN 9780080545547.

Brebbia, C. A. 2016. *Advances in Fluid Mechanics XI.* s.l. : WIT Press, 2016. ISBN 9781784661052.

CFD Modeling of Varied Flow Conditions Over an Ogee-Weir. **Fleit, Gábor, Bihs, Hans y Baranya, Sándor. 2017.** Budapest : Budapesti Műszaki Egyetem, 2017, Periodica Polytechnica Civil Engineering.

Development an equations for flow over weirs using MNLR And CFD simulation approaches. **Al Shaikhli, Hasan Ibrahim y Kadhim , Kadhim Naief. 2018.** 3, 2018, International Journal of Advanced Research, Vol. 9, págs. 70-79. ISSN 09766316.

Duarte Agudelo, Carlos Arturo y Niño Vicentes, José Roberto. 2004. *Introducción a la mecánica de fluidos.* Bogotá D.C. : Universidad Nacional de Colombia, 2004. pág. 220. ISBN 9789587010374.

Ferziger, Joel H. y Peric, Milovan. 2012. *Computational Methods for Fluid Dynamics.* 3. s.l. : Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 9783642560262.

Flow over rectangular sharp-crested weirs. **Bagheri, Sara y Heidarpour, Manouchehr. 2009.** 2, s.l. : Springer Science and Business Media LLC, 2009, Irrigation Science, Vol. 28.

González-Santander Martínez, Juan Luis y Castellano Estornell, Gloria. 2014. *Fundamentos de mecánica de fluidos.* Alicante : Editorial Club Universitario, 2014. pág. 501. ISBN 9788415941798.

Håkansson, Love, y otros. 2011. *Computational Fluid Dynamics for Engineers.* s.l. : Cambridge University Press, 2011. ISBN 1139505564.

Heng Yeoh, Guan y Liu, Chaoqun, Tu, Jiyuan. 2018. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach.* Amsterdam : Butterworth-Heinemann, 2018. pág. 498. ISBN 9780081011270.

Hyndman, Rob J. y Koehler, Anne B. 2006. Another look at measures of forecast accuracy. [aut. libro] Elsevier BV. *International Journal of Forecasting.* s.l. : Elsevier, 2006.

Kleinstreuer, Clement. 2018. *Modern Fluid Dynamics.* 2. s.l. : CRC Press, 2018. ISBN 9781351849647.

Kolditz, Olaf. 2002. Finite Volume Method. *Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2002, págs. 173 - 190.

Lozano, Yunior Gutiérrez. 2016. *Modelación numérica computacional del diseño de un vertedero de pared delgada de sección compuesta.* Tesis de grado. Santa Clara. : Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2016.

MAPE (mean absolute percentage error) MEAN ABSOLUTE PERCENTAGE ERROR (MAPE). **Swamidass, P. M. 2000.** Boston, MA : Springer US, 2000, Encyclopedia of Production and Manufacturing Management.

Mazumder, Sandip. 2016. Chapter 1 - Introduction to Numerical Methods for Solving Differential Equations. *Numerical Methods for Partial Differential Equations: Finite Difference and Finite Volume Methods.* s.l. : Academic Press, 2016, págs. 1-49.

Minkowycz, W. J., y otros. 2017. *Numerical Simulation of Heat Exchangers: Advances in Numerical Heat Transfer.* s.l. : CRC Press, 2017. Vol. 5. ISBN 1482250209.

Mr-CFD. 2020. Hydraulic Structures & Civil Engineering: Mr-CFD. <https://www.mr-cfd.com/services/cfd-consulting/hydraulic-structures/>. [En línea] 18 de enero de 2020. [Citado el: 18 de Enero de 2020.]

Nwanganga, Fred y Chapple, Mike. 2020. *Practical Machine Learning in R*. s.l. : John Wiley & Sons, 2020. ISBN 9781119591511.

OpenCFD Ltd. 2016. File structure of OpenFOAM cases. *Openfoam.com*. [En línea] 2016. [Citado el: 31 de Octubre de 2020.] <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/case-file-structure.php>.

—. **2016.** Openfoam.com. *Standard solvers*. [En línea] 2016. [Citado el: 2 de Noviembre de 2020.] <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/standard-solvers.php>.

OpenFOAM for computational fluid dynamics. **Chen, Goong, y otros. 2014.** 4, s.l. : Not. AMS, 2014, Vol. 61.

2020. OpenFOAM v8 User Guide: 5.2 Boundaries . *CFD Direct*. [En línea] CFD Direct Ltd, 2020. [Citado el: 31 de Octubre de 2020.] <https://cfdirect/openfoam/user-guide/v8-boundaries/>.

Ortíz, Jaime Ernesto Díaz. 2006. *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. s.l. : Universidad del Valle, 2006. pág. 241. ISBN 9586704939.

Potter, Merle C., Wiggert, David C. y Ramadan, Bassem H. 2011. *Mechanics of Fluids*. 4th, Fourth, 4e. s.l. : Cengage Learning, 2011. ISBN 0495667730.

Sharma, Atul. 2016. *Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, Application and Analysis*. s.l. : John Wiley & Sons, 2016.

Singh, Vijay P. 2016. *Handbook of Applied Hydrology*. 2. s.l. : McGraw-Hill Education, 2016. ISBN 9780071835091.

Świątek, Dorota y Okruszko, Tomasz. 2011. *Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment*. s.l. : Springer Science & Business Media, 2011. ISBN 9783642190599.

The OpenFOAM Foundation. 2011. OpenFOAM. *OpenFOAM | The OpenFOAM Foundation*. [En línea] 2011. <https://openfoam.org/>.

Tournier, Jean-Pierre, Bennett, Tony y Bibeau, Johanne. 2019. *Sustainable and Safe Dams Around the World / Un monde de barrages durables et sécuritaires: Proceedings of the ICOLD 2019 Symposium, (ICOLD 2019)*. s.l. : CRC Press, 2019. ISBN 9781000596823.

Vega B., David. 2004. *Estructuras de medición de caudal. Vertederos de pared delgada -rectangular y triangular-*. Cochabamba : Centro andino para la gestión y uso del agua., 2004.

Versteeg, Henk Kaarle y Malalasekera, Weeratunge. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Harlow : Pearson Education Limited, 2007. pág. 503. ISBN 0131274988.

Villamizar Hernández, Alexander. 2014. *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]*. Bogotá D.C. : Repositorio Institucional UN. <https://bit.ly/37jZwLP>, 2014.

Xamán, J. 2016. *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. s.l. : Palibrio, 2016. pág. 432. ISBN 1506509045.

A. Anexo: Guía De Laboratorio

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Ortiz (2006), la hidrodinámica es el componente de la mecánica de fluidos que se encarga del estudio del movimiento de estos. En los últimos tiempos, el análisis y desarrollo de esta ciencia ha empezado a aprovechar las herramientas computacionales y los diferentes softwares disponibles para realizar simulaciones que representen las condiciones de un proyecto o idea que se quiera materializar a corto, mediano o largo plazo, utilizando los métodos numéricos para solucionar las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados (Versteeg, y otros, 2007). Lo anteriormente mencionado se conoce como dinámica de fluidos computacional (más conocida por sus siglas en inglés CFD – Computational Fluid Dynamics –, en adelante CFD).

Si bien existen diversos métodos numéricos para resolver y describir el movimiento de un fluido, el más utilizado es el *método de volúmenes finitos*, que como indica Aztroza Salazar (2017), basa su análisis en la discretización del espacio en numerosos volúmenes de control, aplicado a leyes de conservación con el fin de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes a través de una transición de ecuaciones diferenciales continuas a ecuaciones lineales, facilitando así la modelación o simulación a través de herramientas propias de la dinámica de fluidos computacional. En la actualidad es posible encontrar múltiples programas que se desarrollan en el ámbito de la CFD, de los cuales destacan Fluent y CFX de ANSYS Inc, Star-CCM+ y OpenFOAM,

La ejecución de este laboratorio, pretende llevar a cabo la simulación y análisis del comportamiento hidráulico de un vertedero rectangular sin contracción utilizando OpenFOAM, siendo este un software de uso libre, que no requiere de la compra de una licencia, permitiendo la adaptación de su código según sea conveniente; sus resultados serán comparados con aquellos obtenidos en los ensayos de laboratorio.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

- Capacidad de comprender y aplicar las leyes físicas que gobiernan el comportamiento hidráulico de un vertedero rectangular sin contracción para el aforo de un caudal cuando el agua fluye a superficie libre.
- Capacidad para la investigación formativa, trabajo autónomo y educación virtual.
- Capacidad para aplicar las ciencias básicas en el contexto de la ingeniería civil.
- Capacidad analítica en el contexto de la ingeniería civil enfocada hacia la hidráulica de canales.
- Capacidad deductiva en experimentos con base en un software de simulación computacional.
- Capacidad para el manejo básico de softwares de dinámica de fluidos computacional.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

3. OBJETIVO

3.1 OBJETIVO GENERAL

Simular el flujo de agua sobre un vertedero rectangular de pared delgada y sin contracción, en el canal horizontal abierto del laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia, empleando un software de dinámica de fluidos computacional de uso libre.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer y entender el comportamiento hidráulico de un vertedero rectangular sin contracción, como estructura para la medición de caudales en flujo a superficie libre.
- Conocer y aplicar la metodología para la calibración de un vertedero rectangular sin contracción, utilizando la geometría del canal horizontal a superficie libre existente en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia.
- Determinar, a través de la simulación realizada, la velocidad del flujo y la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero, con el fin de estimar el caudal transportado por el canal del laboratorio de hidráulica.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La CFD es definida por Versteeg y Malalasekera (2007) como el análisis de sistemas que involucran el flujo de los fluidos, la transferencia de calor y otros fenómenos asociados, tal como las reacciones químicas, a través de simulaciones asistidas por computador. De manera similar, Potter, Wiggert y Ramadan (2011) le definen simplemente como aquella que “se ocupa por obtener soluciones numéricas de problemas de flujos de fluidos mediante la computadora”.

En la actualidad existen múltiples programas que permiten la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, uno de ellos es OpenFOAM, un software de uso libre y código abierto que se distribuye bajo una licencia pública general. OpenFOAM se basa en el método de los volúmenes finitos y el uso de módulos en C++ que permiten una sencilla creación de solucionadores numéricos personalizados que facilitan la simulación de problemas de CFD.

La simulación en OpenFOAM requiere de 3 carpetas principales y la malla en formato .UNV.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

- Carpeta 0: Esta carpeta contiene los archivos que permiten configurar en el modelo las propiedades del fluido como densidad, velocidad, turbulencia y energía de turbulencia, así como las condiciones iniciales y de frontera para el tiempo cero.
- Carpeta Constant: Esta carpeta contiene los parámetros de propiedades de transporte, propiedades de turbulencia, gravedad y una subcarpeta denominada "Polymesh" que contiene toda la información de la malla.
- Carpeta System: Esta carpeta contiene los parámetros de tiempo de duración de la simulación, intervalos, volumen inicial y la configuración del solucionador.

4.2 Vertederos

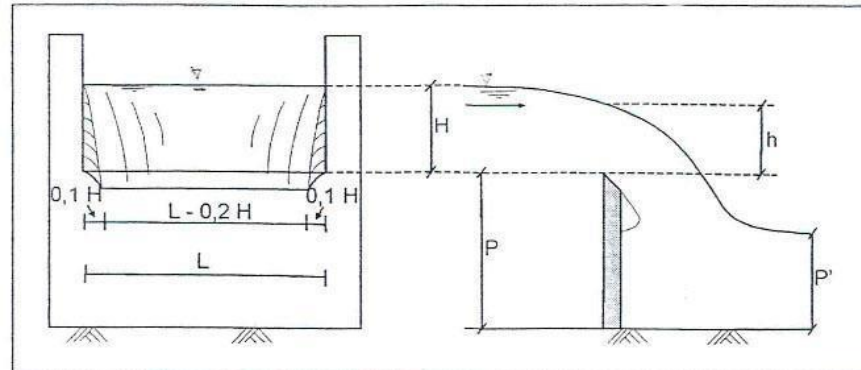
En los softwares que aplican conceptos de la dinámica de fluidos computacional (CFD), es posible simular varias condiciones de flujo para estructuras hidráulicas tales como: Vertederos, alcantarillas y canaletas. Lozano (2016) describe un vertedero como una estructura hidráulica con una abertura que permite la medición del caudal, diseñada para impulsar el flujo aguas arriba, proporcionando un cambio de nivel suficiente para que el agua en curso se vierta o desagüe sobre la obra. Los vertederos pueden ser clasificados según la forma de su abertura, la forma de la cresta, el efecto que tienen sus lados en la lámina de agua y de acuerdo a la naturaleza de la descarga. Las siguientes son las clasificaciones según Bansal (2005):

- De acuerdo a la forma de su abertura: Rectangulares, triangulares y trapezoidales.
- De acuerdo a la forma de la cresta: De placa delgada o cresta afilada, de cresta ancha, de cresta delgada y de perfil Ogee.
- De acuerdo al efecto que tienen sus lados en la lámina de agua: Con y sin contracciones.
- De acuerdo a la naturaleza de la descarga: Sumergido o ahogado.

Los vertederos rectangulares son los más utilizados en la práctica, la Figura 1 muestra el esquema de un vertedero rectangular con dos contracciones según López Cualla (2003).

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

Figura 1. Vertedero rectangular con dos contracciones.



Fuente: (López Cualla, 2003)

Donde L es la cresta del vertedero y H es la carga sobre la cresta.

4.2.1 Ecuación de cálculo del caudal

La ecuación para general para el cálculo del caudal en un vertedero rectangular tiene la forma:

$$Q = CH^n \text{ (Ecuación 1)}$$

Q = Caudal en el vertedero (m^3/s)

C y n = Coeficientes que dependen de las características del vertedero.

H = Carga sobre el vertedero (m)

Según Netto y Fernández (1998) la forma más aproximada para determinar el caudal es a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left(L - \frac{nH}{10} \right) * H^{3/2} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

Q = Caudal en el vertedero (m^3/s)

C_d = Coeficiente de descarga del vertedero.

L = Longitud de la cresta del vertedero (m)

n = Número de contracciones del vertedero (0, 1 o 2).

H = Carga sobre el vertedero en m.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

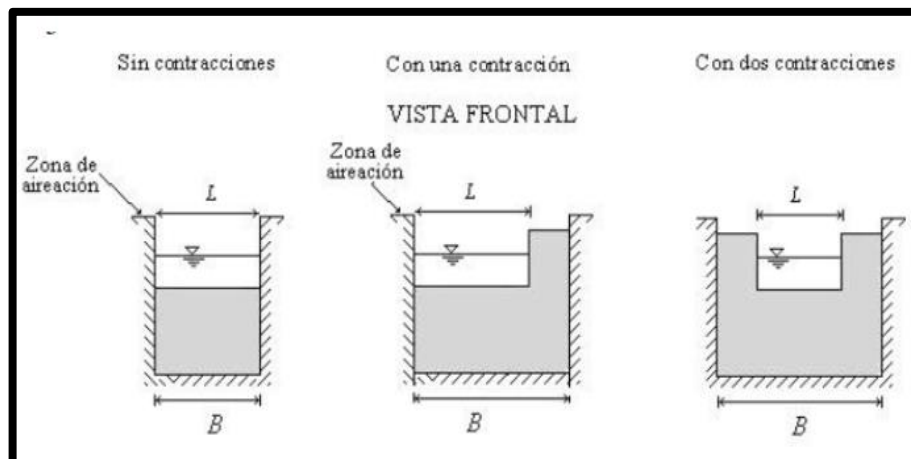
Para el caso en que el vertedero no tenga contracciones ($n = 0$) y considerando un valor promedio del coeficiente de descarga $C_d = 0,62$ el caudal sobre la cresta del vertedero es:

$$Q = 1,84LH^{3/2} \text{ (Ecuación 3)}$$

Si el vertedero tiene dos contracciones el caudal sobre la cresta del vertedero es igual a:

$$Q = 1,84 \left(L - \frac{2H}{10} \right) * H^{3/2} \text{ (Ecuación 4)}$$

Figura 2. Vertederos sin una contracción, con una contracción y con dos contracciones.



Fuente: (Barboza, Echegaray, Salazar, Valladolid y Velásquez, 2014)

Donde L es el ancho de la cresta del vertedero y B es el ancho del canal.

4.2.2 Ecuaciones para desarrollo del modelo

Con el fin de poner en marcha el modelo, es necesario aplicar una serie de ecuaciones, que permitirán realizar una simulación lo más precisa posible, dependiendo del caudal a trabajar.

Las siguientes variables deben calcularse para cada caso de simulación, pues dependen principalmente del caudal que es un parámetro que varía en cada medición, así también,

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

se hace necesario modificar en el código adjunto, cada una de estas variables, antes de poner en marcha la ejecución del modelo.

Velocidad (U):

$$U = \frac{Q}{A} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

U = Velocidad del fluido m/s^2 .

Q = Caudal en el vertedero en m^3/s .

A = Área del canal.

Número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{U * L}{\nu} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

U = Velocidad del fluido m/s^2 .

L = Longitud de la cresta del vertedero en m.

ν = Viscosidad cinemática del fluido m^2/s .

Intensidad de turbulencia (Ti):

$$Ti = 0.16 * Re^{-\frac{1}{8}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

Ti = Intensidad de turbulencia.

Re = Número de Reynolds.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

Escala de longitud turbulenta (l):

$$l = 0.07 * L \text{ (Ecuación 8)}$$

l = Escala de longitud turbulenta

L = Profundidad hidráulica m .

Energía de turbulencia (k) :

$$k = \frac{3}{2} (U * Ti)^2 \text{ (Ecuación 9)}$$

Donde:

k = Energía turbulenta.

U = Velocidad del fluido m/s^2 .

Ti = Intensidad de turbulencia.

Épsilon (ϵ):

$$\epsilon = Cu^{\frac{3}{4}} \left(\frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \right) \text{ (Ecuación 10)}$$

Donde:

ϵ = Parámetro de la distancia de disipación m^2/s^3 .

Cu = Constante=0.09.

Número de Courant:

$$Co = \frac{U * \Delta t}{\Delta x} < 1 \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

Co = Número de Courant.

U = Velocidad del fluido m/s^2 .

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

Δ_t = Intervalo de tiempo para creación de carpetas para tiempo de simulación.

Δ_x = Tamaño mínimo de celda en la malla = 0.05

Se sugiere estimar un Courant igual a entre 0.5 y 0.7 para calcular el intervalo de tiempo. Una vez defina el intervalo de tiempo con el cual trabajará su simulación, es necesario que recalculé este valor.

Tiempo total de simulación: (T_t):

$$t_T = \frac{L}{U} \text{ (Ecuación 12)}$$

Donde:

t_T = Tiempo total de simulación (s)

U = Velocidad del fluido (m/s^2)

L = Longitud total del canal (m)

5. RECURSOS UTILIZADOS

Equipos	Software	Materiales
Computador de mesa o portátil con sistema operativo Ubuntu o máquina virtual de Ubuntu para Windows.	OpenFOAM última versión consultar en www.openfoam.org	Calculadora científica.
	Microsoft Excel.	Libro de anotaciones.

6. PROCEDIMIENTO

6.1 Experimental

Para el caso a desarrollar se han establecido unas restricciones que determinarán el comportamiento del modelo, estas son conocidas también como condiciones de frontera

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

del proyecto, definidas para este caso como: inlet (entrada del agua), outlet (salida del agua), wall (paredes laterales y fondo del canal) y atmosphere (parte superior del canal a flujo libre).

Para el desarrollo de la práctica se sigue el procedimiento que se presenta a continuación:

- a) Instale el sistema operativo Ubuntu en su ordenador o en su defecto una máquina virtual de Ubuntu para Windows.
- b) Instale el programa OpenFOAM en su última versión, puede obtenerla en <https://openfoam.org/>
- c) Verifique que tenga dentro de su carpeta general de la simulación tres subcarpetas llamadas 0, Constant y System, además de un archivo individual llamado Mesh_1.unv.



- d) Se sugiere hacer una copia de los archivos suministrados y dejarlos guardados como base para todas las simulaciones.
- e) Abra la carpeta "0" y modifique los archivos llamados *epsilon* y *k*, ingresando los valores calculados mediante las ecuaciones suministradas en el numeral 4.2.2

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

```

1 /*-----* C++ *-----*/
2
3 // F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 // O p e r a t i o n | Version: dev
5 // A n d           | Web: www.OpenFOAM.org
6 // M a n i p u l a t i o n
7
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         volScalarField;
13     location      "0";
14     object        epsilon;
15 }
16 // *****
17
18 dimensions      [0 2 -3 0 0 0];
19
20 internalField    uniform 0.000451725204350266;
21
22 boundaryField
23 {
24     inlet
25     {
26         type      fixedValue;
27         value      uniform 0.000451725204350266;
28     }
29     wall
30     {
31         type      epsilonWallFunction;
32         value      uniform 0.000451725204350266;
33     }
34 }
35 atmosphere

```

```

1 /*-----* C++ *-----*/
2
3 // F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 // O p e r a t i o n | Version: dev
5 // A n d           | Web: www.OpenFOAM.org
6 // M a n i p u l a t i o n
7
8 FoamFile
9 {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         volScalarField;
13     location      "0";
14     object        k;
15 }
16 // *****
17
18 dimensions      [0 2 -2 0 0 0];
19
20 internalField    uniform 0.000174708680896723;
21
22 boundaryField
23 {
24     inlet
25     {
26         type      fixedValue;
27         value      uniform 0.000174708680896723;
28     }
29     wall
30     {
31         type      kqRWallFunction;
32         value      uniform 0.000174708680896723;
33     }
34 }
35 atmosphere

```

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

En el archivo de velocidad (U) solamente deberá introducir el valor en el campo *inlet*.

```

1 1/*-----* C++ *-----*/
2 2
3 3  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 4  O p e r a t i o n | Version: 5
5 5  A n d           | Web: www.OpenFOAM.org
6 6  M a n i p u l a t i o n
7 7 *-----*
8 8 FoamFile
9 9 {
10 10     version      2.0;
11 11     format        ascii;
12 12     class          volVectorField;
13 13     location       "0";
14 14     object          U;
15 15 }
16 16 // *****
17 17
18 18 dimensions       [0 1 -1 0 0 0];
19 19
20 20 internalField     uniform (0 0 0);
21 21
22 22 boundaryField
23 23 {
24 24     inlet
25 25     {
26 26         type        fixedValue;
27 27         value        uniform (0.2430 0 0);
28 28     }
29 29     outlet
30 30     {
31 31         type        inletOutlet;
32 32         inletValue    uniform (0 0 0);
33 33         value         uniform (0 0 0);
34 34     }
35 35     wall

```

- f) En la carpeta “System” deberá modificar el archivo llamado “controlDict” que es el encargado de especificar los controles del caso a simular. Solo es necesario especificar el tiempo total de simulación (*endTime*) y el intervalo de tiempo (*writeInterval*), calculados empleando las ecuaciones del numeral 4.2.2

```

1 1/*-----* C++ *-----*/
2 2
3 3  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 4  O p e r a t i o n | Version: dev
5 5  A n d           | Web: www.OpenFOAM.org
6 6  M a n i p u l a t i o n
7 7 *-----*
8 8 FoamFile
9 9 {
10 10     version      2.0;
11 11     format        ascii;
12 12     class          dictionary;
13 13     location       "system";
14 14     object          controlDict;
15 15 }
16 16 // *****
17 17
18 18 application       interFoam;
19 19
20 20 startFrom          latestTime;
21 21
22 22 startTime          0;
23 23
24 24 stopAt             endTime;
25 25
26 26 endTime            20;
27 27
28 28 deltaT             0.001;
29 29
30 30 writeControl        adjustableRunTime;
31 31
32 32 writeInterval       0.2;
33 33
34 34 purgeWrite         0;
35 35

```

- g) Es necesario exportar la malla a OpenFOAM, por lo cual deberá abrir el directorio donde almacena su proyecto y abrirlo en la terminal (click derecho, abrir en terminal). Una vez abierta la terminal, escriba el siguiente comando:

ideasUnvToFoam Mesh_1.unv

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

y después presione enter. Este paso va a generar una subcarpeta dentro de la carpeta “*Constant*” que contiene toda la información de la malla como límites, caras, puntos, vértices etc.

- h) Abra la carpeta “*Constant*” y posteriormente la carpeta *polymesh*; el archivo “*Boundary*” contiene las restricciones geométricas de la malla, por defecto el tipo de restricción (*type*) para la frontera *wall* será “*patch*” que es de tipo genérico y no contiene información geométrica, por lo tanto, es necesario cambiar el tipo de restricción a “*wall*” que coincide con una pared sólida, necesario para el modelo físico.
- i) Abra nuevamente la carpeta del proyecto en la terminal ingrese el siguiente comando para verificar que la malla se ha generado correctamente:

checkMesh

Compruebe que al final de la verificación diga: *Mesh OK*.

- j) Ingrese el comando

setFields

Con esto usted estará aplicando las condiciones que han sido modificadas o predeterminadas. La característica principal de este archivo, es que es posible indicar al programa que corra con un volumen inicial de agua para disminuir el tiempo computacional y de simulación; en la opción “*boxToCell*” se introducen las coordenadas del inicio del volumen correspondientes a (0, 0, 0) y las coordenadas donde se quiere que finalice el volumen de agua, correspondientes a (2.5, 0.075, 0.12). Todas las medidas están expresadas en sistema internacional (SI).

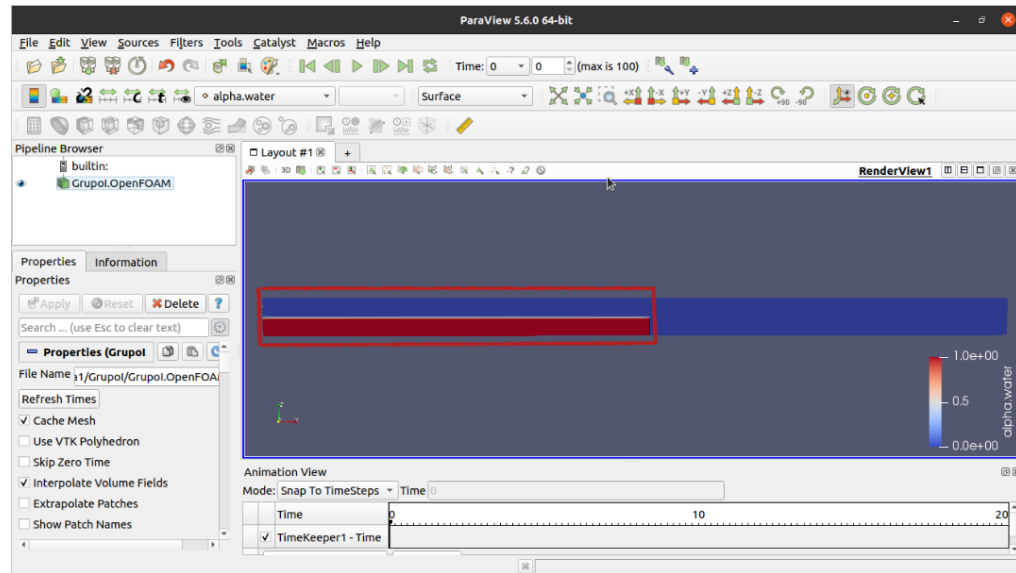
```

1 1 //----- C++ -----
2 2 //----- C++ -----
3 3 //----- C++ -----
4 4 //----- C++ -----
5 5 //----- C++ -----
6 6 //----- C++ -----
7 7 //----- C++ -----
8 8 //----- C++ -----
9 9 {
10 10     version      2.0;
11 11     format       ascii;
12 12     class        dictionary;
13 13     location      "system";
14 14     object        setFieldsDict;
15 15 }
16 16 //----- C++ -----
17 17 //----- C++ -----
18 18 defaultFieldValues
19 19 {
20 20     volScalarFieldValue alpha.water 0
21 21 };
22 22
23 23 regions
24 24 {
25 25     boxToCell
26 26     {
27 27         box (0 0 0) (2.5 0.075 0.12);
28 28         fieldValues
29 29         {
30 30             volScalarFieldValue alpha.water 1
31 31         }
32 32     }
33 33 };
34 34
35 35

```

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

Al finalizar este proceso, el canal con el volumen inicial se visualizará así:



- k) Está todo listo para correr la simulación. Para ello usted puede copiar cualquiera de estos comandos en la terminal:

```
interFoam
interFoam > log &
```

El primero mostrará los resultados directamente en la terminal y el segundo los redirigirá al archivo "log", que se colocará en el directorio en el que está trabajando.

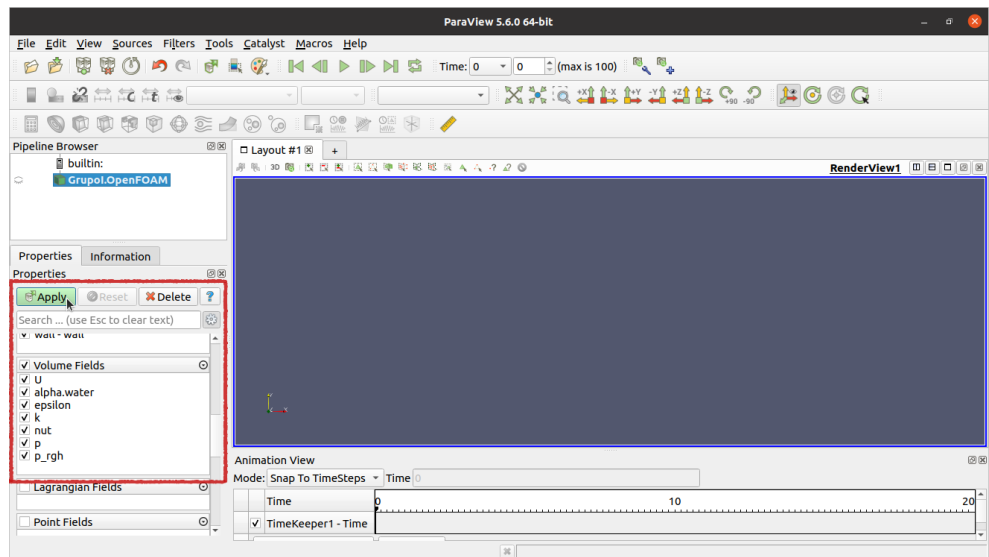
El tiempo que tomará este proceso depende de la capacidad de procesamiento de su equipo.


- l) Una vez terminado el proceso los resultados podrán ser visualizados y analizados en la herramienta Paraview, para abrirla ejecute el siguiente comando:

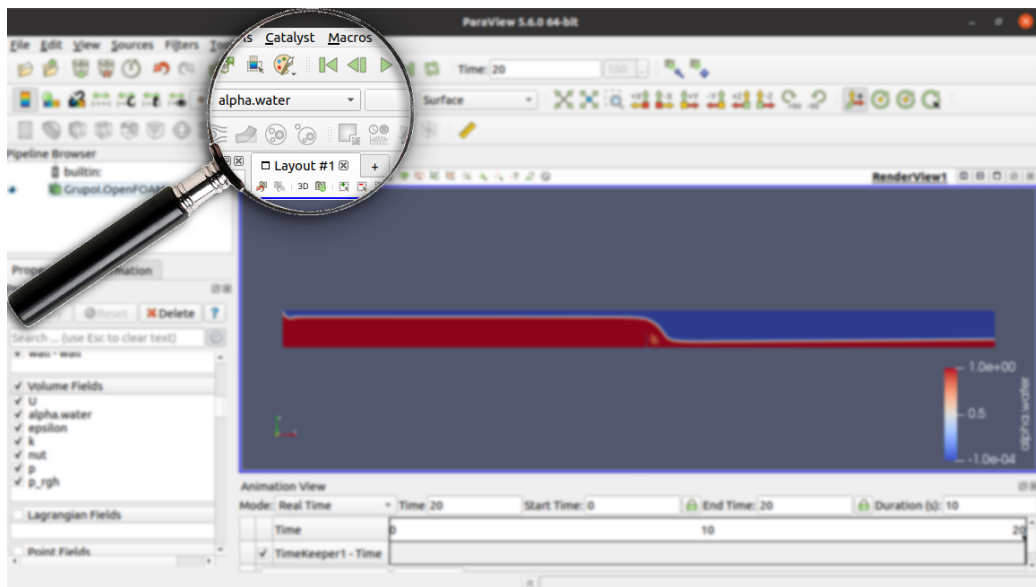
```
paraFoam
```

En la parte inferior izquierda, en la pestaña de propiedades asegúrese de tener encendidas todas las variables y dé click en Apply.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		



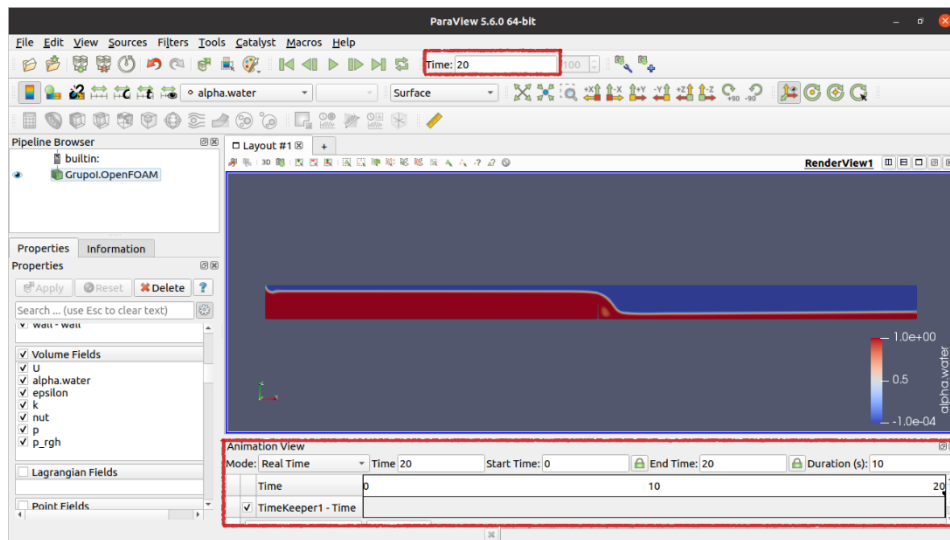
- m) En la cinta opciones, despliegue el menú y elija “*alpha.water*” que corresponde al nivel de la lámina de agua; seleccione la orientación de la vista para que pueda ser visualizado de perfil. Oprima “Play” .



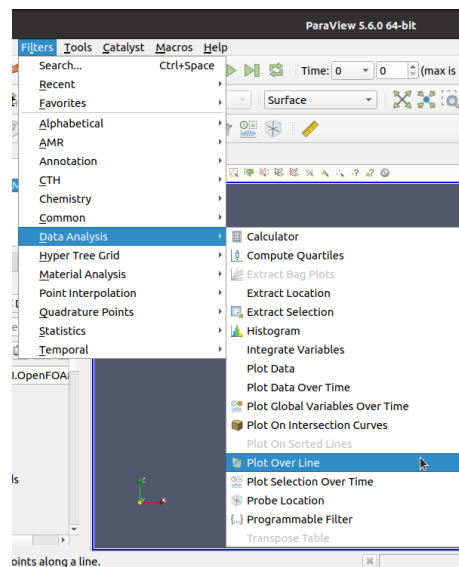
6.2 Extracción de resultados para análisis

- a) Ubíquese en el último intervalo de tiempo.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

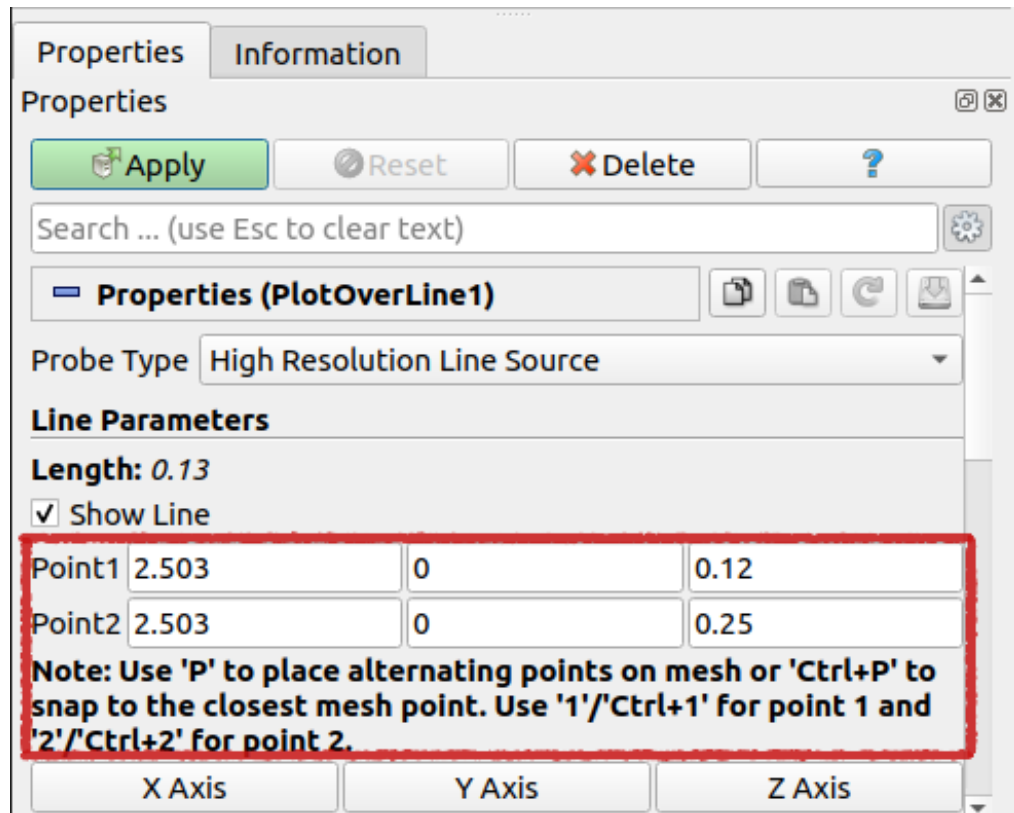


b) Seleccione el menú *Filters* → *Data analysis* → *Plot over line*.



c) En la parte izquierda, en “*Line parameters*” introduzca las coordenadas correspondientes a la ubicación del vertedero en x , y y z , representadas por las columnas (de izquierda a derecha) como se muestra a continuación:

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

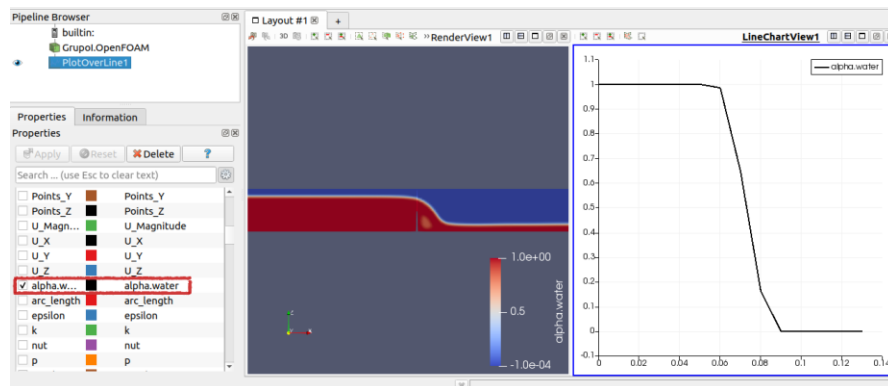


Se pretende crear una línea recta con dos puntos justo en el punto de interés, esto es, sobre la cresta del vertedero. Su ubicación en x (tanto para el punto 1 como para el punto 2) es 2.503m; esto quiere decir que estarán justo en la mitad de la cresta en la dirección x , tomando como punto 0 el inicio del canal. Para las coordenadas en y , el valor será 0 en ambos puntos, pues se quiere una línea visible en la cara lateral que se está visualizando en Paraview. En la coordenada z del punto uno es 0.12m, la altura de la cresta del vertedero, y en el punto dos es 0.25m que representa la altura del canal.

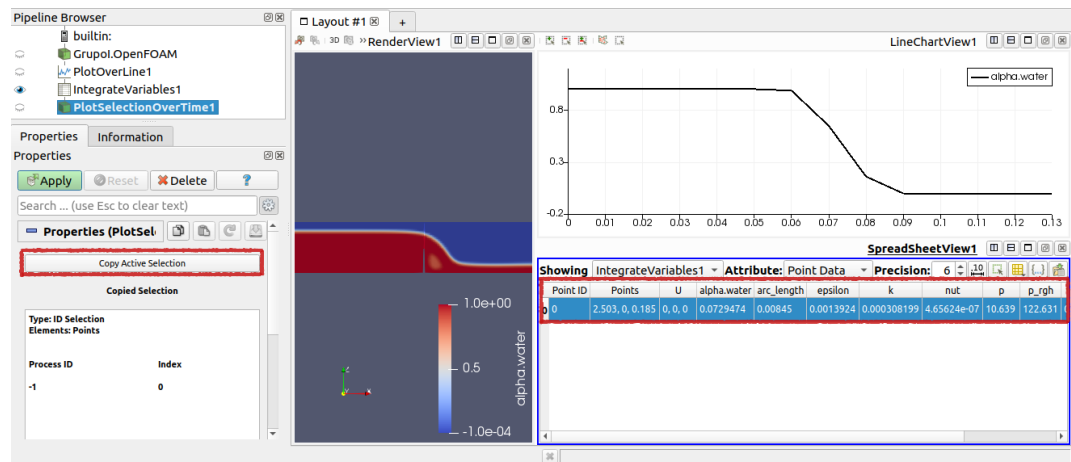
Después dé click en "Apply".

- d) Cuando se genere la gráfica, vaya a "series parameters" y deje activada solamente la casilla de "alpha.water".

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

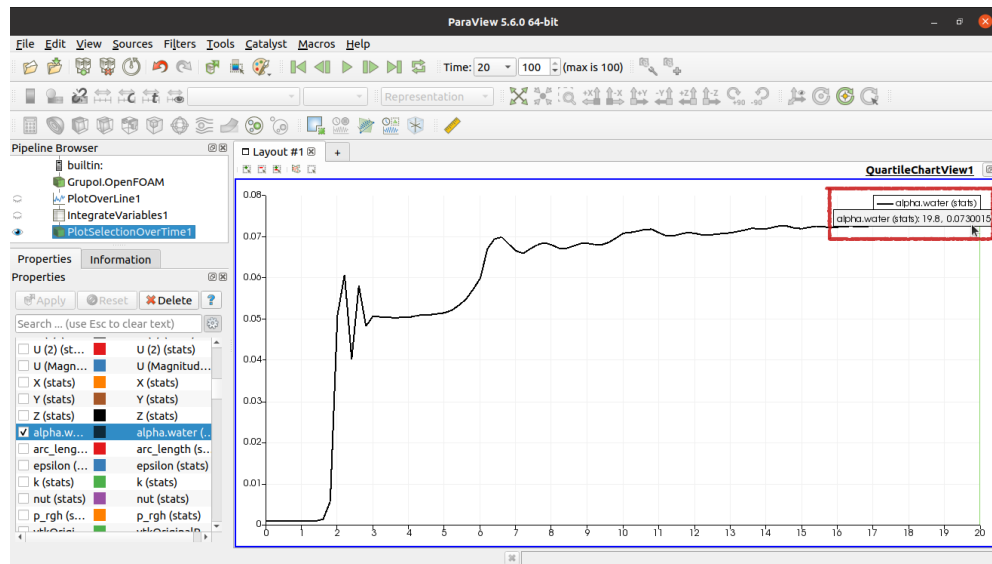


- e) Ingresar nuevamente la pestaña *Filters* → *Data analysis* → *Integrate variables*, después oprimir “Apply”. Aparecerá una tabla de datos, seleccione la fila resaltada en azul y vaya de nuevo al menú pestaña *Filters* → *Data analysis* → *Plot selection over time*; en la sección izquierda, en propiedades dé click en “Copy Active Selection” y después oprima “Apply”.



- f) Aparecerá la gráfica de la altura de la lámina de agua contra el tiempo. Usted podrá obtener los datos de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero en cualquier intervalo de tiempo, ubicando el cursor en el punto de la línea que desee consultar. Aparecerán dos valores: el primero corresponde al tiempo y el segundo a la altura de la lámina de agua.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		



- g) Repita este mismo procedimiento para extraer los datos de velocidad, ubicándose en el paso d), dejando únicamente activa la casilla “U” en lugar de “alpha.water”.
- h) Repita este mismo procedimiento para todos los caudales resultantes del ensayo de laboratorio de aforadores de caudal para un vertedero de una contracción, realizado previamente en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia

Recomendaciones:

- Guarde los archivos base en otra ubicación y haga una copia cuando necesite hacer una nueva simulación.
- Procure guardar su proyecto en directorios con rutas cortas, si el nombre o la ruta de su proyecto es muy largo, puede generar un error pues los sistemas operativos cuentan con un límite de rutas de 260 caracteres.
- Copie y pegue los comandos suministrados tal cual como están escritos en este procedimiento ya que la terminal distingue mayúsculas y minúsculas.
- El procedimiento es muy sencillo, ¡no se desanime! Solo tiene que seguir paso a paso el proceso indicado. Éxito.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

7. REGISTRO DE DATOS Y RESULTADOS

Parámetros	Grupos de modelación						
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
Q (m ³ /s)							
L (m)	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120
B (m)	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075
A (m ²)							
U (m ² /s)							
v (m ² /s)							
Re							
Ti							
l (m)							
Cu							
k (m ² /s ²)							
ε							
Δt							
C							

Donde: L (m): Altura del vertedero y B (m): Ancho del canal.

Los caudales que debe utilizar en la tabla, son los obtenidos en el ensayo de laboratorio de aforadores de caudal para un vertedero de una contracción, realizado previamente en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica de Colombia.

8. PASOS GUÍA PARA EL DESARROLLO DEL INFORME

- Realice una gráfica de caudal contra altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero, de los datos modelados.
- Realice el ajuste lineal y determine R².
- Determine la ecuación de calibración del vertedero rectangular de una contracción.
- Haga una comparación gráfica entre los resultados obtenidos experimentalmente y aquellos modelados.
- Interprete los resultados.
- Presente las memorias de cálculo de todas las operaciones realizadas en este laboratorio.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

- Presente un análisis de resultados obtenidos en esta práctica, así como unas conclusiones de la misma.

9. CÁLCULOS Y ANÁLISIS A REALIZAR

9.1 Determinación de alturas. *(Ver video adjunto)*

Extraer la altura de la lámina de agua sobre el vertedero para cada caudal, según el proceso explicado en este informe y en el video adjunto.

9.2 Determinación de velocidades.

Extraer la velocidad para cada caudal, según el proceso explicado.

9.3 Ecuación de calibración del vertedero.

Con la ecuación de calibración del vertedero obtenida a partir de los datos simulados, calcule el caudal para cada uno de los grupos de modelación.

9.4 Error porcentual.

Calcule el error porcentual de los caudales y las alturas, así:

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Valor experimental} - \text{Valor teórico}}{\text{Valor experimental}} * 100 \text{ (Ecuación 13)}$$

Donde:

% Error = Porcentaje de error entre lo medido y lo simulado.

Valor experimental = Caudal medido.

Valor teórico = Valor de caudal a partir de las ecuaciones

10. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Aguilar, D., & Escobar, A. (2020). *Simulación del flujo de agua sobre un vertedero rectangular, mediante el uso de una herramienta aplicada a la dinámica de fluidos computacional*. Tesis de Pregrado, Bogotá D.C., Bogotá D.C.

Barboza, Echegaray, Salazar, Valladolid y Velásquez. (2014). *Vertederos rectangulares*. Lambayeque, Perú.: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Programa:	Ingeniería Civil	Asignatura:	Hidráulica y Laboratorio
Práctica N°:	1	Duración:	Una hora
Versión:	1	Fecha:	29 de octubre de 2020
Nombre de la práctica:	Simulación de flujo de agua sobre un vertedero rectangular.		

Villamizar Hernández, A. (2014). *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal*. Bogotá D.C.: Repositorio Institucional UN.